Constantin **AGOURIDAS** • Jean-Claude **BERNIER** • Danièle **OLIVIER** • Paul **RIGNY**

LA Chimie, L'Énergie ET LE Climat

COLLECTION CHIMIE ET... JUNIOR

edp sciences

Fondation de la Maison de la Chimie

Constantin **AGOURIDAS** • Jean-Claude **BERNIER** • Danièle **OLIVIER** • Paul **RIGNY**

CHIMIE ET... JUNIOR

Collection dirigée par Bernard **BIGOT**, Président de la Fondation Internationale de la Maison de la Chimie

LA Chimie, L'Énergie ET LE Climat

edp sciences

Fondation de la Maison de la Chimie

Les textes de cet ouvrage sont majoritairement inspirés des livres *Chimie et enjeux énergétiques* (Collection Chimie et…, EDP Sciences, 2014) et *Chimie et changement climatique* (Collection Chimie et…, EDP Sciences, 2016) par :

Constantin Agouridas : directeur Programmes et Projets à la Fondation de la Maison de la Chimie, ex-directeur de Recherche Aventis et Galderma, ex-professeur et directeur de Relations Industrielles à l'ENS Chimie-ParisTech

Jean-Claude Bernier : professeur émérite de l'Université de Strasbourg, ancien directeur de l'Institut de Chimie du CNRS

Danièle Olivier : professeure des universités, vice-présidente de la Fondation de la Maison de la Chimie, ancien directeur de l'ENS Chimie-ParisTech

Paul Rigny : ancien rédacteur-en-chef de *L'Actualité Chimique*, ancien directeur de l'Institut de Chimie du CNRS

Pour le coin des jeux, **Michel Criton** est professeur certifié de mathématiques. Il est président de la Fédération française des jeux mathématiques et membre de la rédaction des magazines Tangente et Spécial Logique.

Illustrations (conception - production) : Cécile Parry – www.swities.com

Composition : Patrick Leleux PAO

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-2098-6 – ISSN : 2426-0185

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinés à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2017

SOMMAIRE

Introduction 4

PARTIE 1 NOTRE FUTUR CLIMATIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

1. Le changement climatique 6

2. De la force musculaire aux énergies renouvelables..... 22

3. Pouvons-nous dissocier l'énergie de l'eau ?..... 38

PARTIE 2 COMMENT SE PASSER DES ÉNERGIES FOSSILES ?

4. La biomasse : un réservoir d'énergie pour demain..... 50

5. Le transport ou le stockage de l'énergie électrique 61

6. Le challenge de l'électricité verte 76

7. Le CO_2, matière première de la vie 87

PARTIE 3 LES CHIMISTES AU SERVICE DU MIX ÉNERGÉTIQUE

8. Les chimistes et l'énergie dans le monde..... 96

9. Les chimistes et l'énergie en France..... 119

10. Les fiches métier 121

PARTIE 4 LE COIN DES JEUX

11. Énigmes..... 132

12. Mots croisés 139

INTRODUCTION

La collection **« Chimie et… Junior »** a pour objectifs :

– **d'illustrer** par des exemples issus de récents résultats de la recherche académique et industrielle, **le programme du cycle C4 des collèges** ;

– de faire **agréablement** découvrir aux **collégiens** et aux **lycéens**, l'importance des sciences de la chimie dans la vie quotidienne, notamment dans les domaines porteurs, afin de les aider à choisir leur orientation et à préparer leur avenir professionnel.

Les trois premiers volumes de cette collection ont été consacrés à : la **Chimie dans le sport** (2014), la **Chimie dans les Technologies de l'Information et de la Communication** (2015) (Coup de cœur Jeunesse du Prix Roberval), la **Chimie et la sécurité** des personnes, des biens, de la santé et de l'environnement (2016).

De 7 milliards d'habitants aujourd'hui sur la planète nous passerons à 9 milliards en 2050. Nous consommerons plus d'énergie alors que les principales sources utilisées (charbon, pétrole, gaz) sont carbonées et s'épuisent. Actuellement, la Terre reçoit plus d'énergie en provenance du Soleil qu'elle n'en réémet et on observe un réchauffement climatique attribué pour beaucoup de scientifiques aux gaz à effet de serre et notamment au dioxyde de carbone produit par la combustion des énergies fossiles.

Quelle que soit l'origine du réchauffement climatique, décarboner l'énergie et remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables est donc essentiel et ces dernières jouent et joueront dans l'avenir un rôle de plus en plus important mais il faut savoir que de nombreuses difficultés scientifiques restent à résoudre : cela prend du temps, coûte de l'argent et demande un changement de nos habitudes.

Ce challenge concerne tous les habitants de notre planète, quel que soit leur âge. Chacun doit faire des efforts mais il faut comprendre ce qui se passe pour bien choisir ce qu'il faut faire. C'est ce que nous voulons apporter à nos jeunes lecteurs (et à leur famille) de façon agréable mais scientifiquement rigoureuse. Nous voulons aussi leur montrer qu'il leur sera possible de contribuer à cet effort à travers des métiers passionnants.

La compréhension de cet ouvrage a été testée sur des collégiens de différentes classes (merci à Max, Baptiste et Laura). Nous espérons qu'il plaira à leurs camarades et qu'il sera à la base de discussions enrichissantes avec leurs professeurs et leurs parents.

Danièle Olivier
Vice-Présidente de la Fondation de la Maison de la Chimie

1 PARTIE

NOTRE FUTUR CLIMATIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Notre Terre a vu, au cours de millions d'années, ses continents et ses mers changer. Son atmosphère, sa température ont varié de nombreuses fois au cours des temps anciens. Pourtant, la vie d'abord d'infimes bactéries s'est développée jusqu'à permettre à plus de six milliards de terriens d'y vivre. Les développements de population se sont accompagnés d'une nouvelle agriculture et de nouvelles activités industrielles. Les besoins en énergie, l'accumulation de gaz à effet de serre vont-ils menacer, au XXIe siècle, l'équilibre de notre planète ?

La machine du climat

Qu'est ce qui nous chauffe sur Terre ? Le Soleil bien sûr mais toute son énergie est-elle bien reçue et qu'est-ce qui empêche le rayonnement de s'évader vers le cosmos ?

Remarque

À nos latitudes en Europe et en France, on estime recevoir environ 200 W/m^2 au sol.

Le rayonnement solaire

Sur Terre, nous avons la chance de disposer d'un radiateur rayonnant depuis la nuit des temps : le Soleil. Il envoie, journellement, par ses rayons une énergie de 340 watts par mètre carré dans la haute atmosphère.

Nous sentons bien cette chaleur quand nous nous plaçons au Soleil. C'est que dans le rayonnement solaire, il existe à côté du rayonnement visible, des rayons de longueur d'onde que l'on ne voit pas (*Fig. 1*).

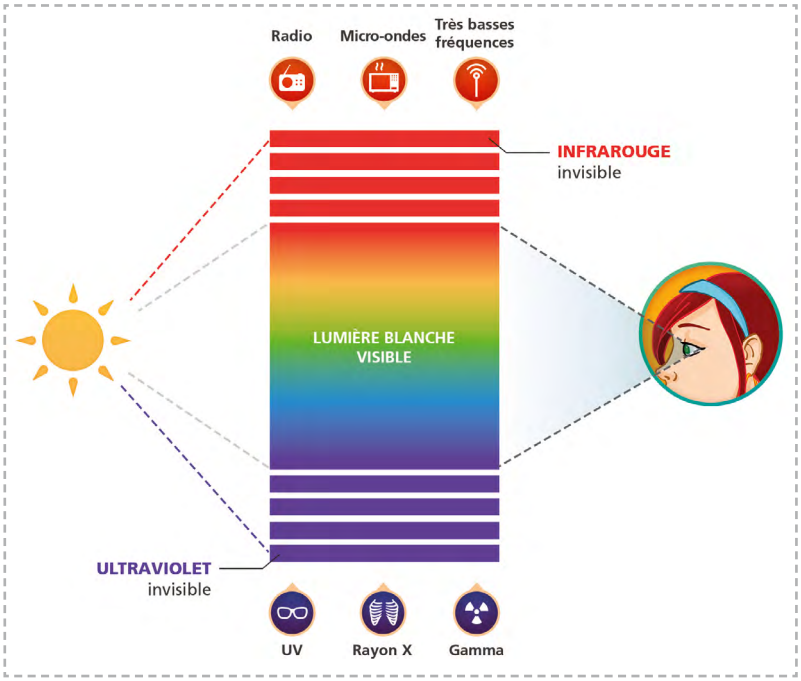


Figure 1

Le rayonnement solaire comprend une partie du rayonnement visible par l'œil humain.

Les UV (ultra-violet) dangereux pour la peau sont filtrés en altitude par l'ozone. L'infrarouge (IR) nous chauffe bien plus en été qu'en hiver et le jour que la nuit.

L'effet de serre

Vous avez déjà remarqué que les nuits où le ciel est clair, sont plus froides que les nuits où le ciel est couvert. Dans la journée, sous le Soleil, le sol accumule de la chaleur qu'il réémet sous forme d'infrarouge la nuit vers la stratosphère. Une partie de cette émission est arrêtée et renvoyée vers le sol par les nuages (constitués d'eau) et d'autres gaz dits à effet de serre.

C'est l'effet de serre qui permet d'avoir une température moyenne sur Terre qui autorise la vie, environ 15 °C. S'il n'y en avait pas, nous aurions très froid, s'il y en avait trop alors la température se dérèglerait et nous aurions trop chaud (*Fig. 2*).

C'est un peu la même chose qui se passe dans une automobile ou une serre où le Soleil pénètre par les surfaces vitrées mais où les infrarouges sont arrêtés par le toit, ce qui fait monter la température dans la voiture ou dans la serre.

Figure 2

Principe de l'effet de serre.

Les gaz à effet de serre

Ils sont composés de molécules à forte absorption de l'infrarouge :

- l'eau (qui sous forme de glace constitue les nuages) ;
- le dioxyde de carbone CO_2 ;
- le protoxyde d'azote N_2O ;
- le méthane CH_4 ;
- d'autres composés dont les aérosols qui sont d'origine naturelle (le sable, le sel) ou artificielle (suie, sulfates).

Tous ces gaz ont des teneurs très différentes qui vont de quelques centaines de ppm (partie par million) à quelques centaines de ppb (partie par milliard) (*Tab. 1*).

Tableau 1 **Comparaison de la teneur de gaz à effet de serre dans l'atmosphère actuelle et en 1800.**

Gaz	% atmosphère actuelle	% atmosphère en 1800
CO_2	400 ppm	280 ppm
CH_4	1790 ppb	700 ppb
N_2O	330 ppb	270 ppb
CFC, HCFC	0,400 ppb	/

Ces constituants de l'atmosphère vont déterminer l'équilibre entre l'énergie qui est absorbée par notre planète et celle qui est émise vers l'espace. C'est le « forçage radiatif » qui est l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnement infrarouge sortant de l'atmosphère. Une partie de l'énergie émise par le soleil pénètre jusqu'au sol et le chauffe. À son tour, le sol émet de l'énergie par rayonnement infrarouge mais il n'y a que 15 à 30 % qui sont renvoyés vers le cosmos car une part importante est absorbée par les nuages et les gaz à effet de serre et peut contribuer au réchauffement de la planète.

Les variations du climat au cours des âges

Comment peut-on connaître le climat qui régnait sur Terre il y a 500 000 ans ? La glace des pôles est l'archive des neiges qui tombaient il y a des milliers d'années. Les géologues et les géochimistes arrivent à analyser l'eau qui composait cette neige et remontent aux variations étonnantes du climat.

De même, les historiens pour le dernier millénaire, en retrouvant les archives papier, nous disent comment était le climat, enfin depuis l'ère industrielle pour le XX^{e} siècle, un réchauffement de la planète semble se faire jour.

L'eau et sa vapeur, indices de la température

L'eau comporte 99 % de molécules H_2O, mais elle compte aussi de toutes petites quantités de molécules composées d'un isotope de l'hydrogène le deutérium D de masse atomique 2 au lieu de 1 pour l'hydrogène et d'un autre isotope H_2O^{18} où l'isotope O^{18} de l'oxygène est plus lourd que l'oxygène normal O^{16}.

Dans la vapeur d'eau, à haute température, on trouve plus d'isotopes lourds que dans la vapeur d'eau à basse température. Si, par analyse de spectrométrie de masse, on arrive à trouver le rapport d'isotopes O^{18}/O^{16}, on peut remonter à la température à laquelle a été émise la vapeur

Remarque

Les isotopes d'un même élément chimique possèdent le **même nombre d'électrons** et de protons, mais un **nombre différent de neutrons dans le noyau**. Ils ont donc une masse M atomique différente. Ici pour l'eau H_2O^{16} : M = 18, HDO^{16} : M = 19, H_2O^{18} : M = 20.

d'eau. Si on a la chance de trouver de la glace vieille de 100 000 ans et si on analyse cette eau gelée, on trouvera alors la température de cette époque.

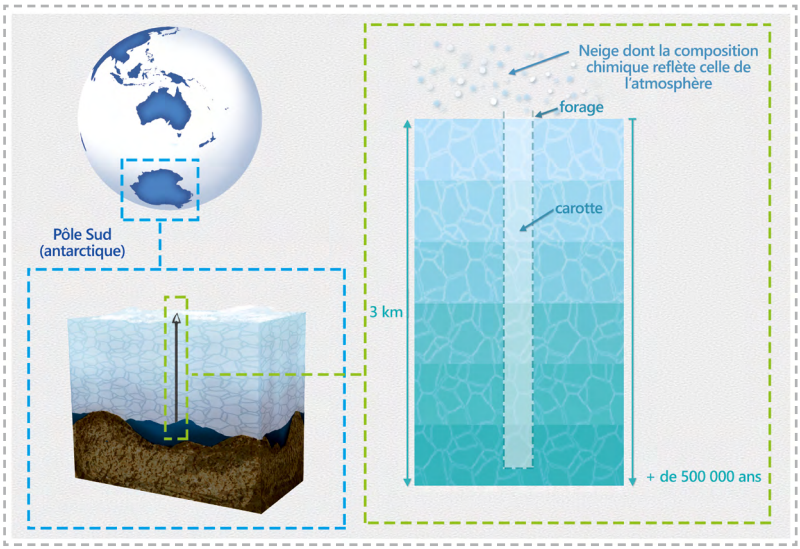
L'analyse des carottes glaciaires et les paléoclimats

Sur le continent antarctique (pôle Sud) la température moyenne est de -55°c et il tombe à peu près 20 cm de neige par an, et comme elle ne fond jamais, elle s'accumule sur des kilomètres de profondeur depuis des milliers d'années. Les cristaux de neige ont la composition en isotopes de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère il y a des milliers d'années.

Des missions internationales de géologues ont réussi à creuser et forer ces montagnes de glace (*Fig. 3*) et à remonter des échantillons sous formes de cylindres issus de différentes profondeurs jusque – 3000 mètres qu'on appelle « carottes de glace ». Bien conservées au froid elles sont les témoins de la neige tombée depuis plus de 500 000 ans.

Figure 3

Principe de la carotte glaciaire.



Les résultats des analyses de la glace

Les géochimistes ont analysé la glace de ces carottes (*Fig. 4*) :

- en déterminant les rapports isotopiques O^{18}/O^{16} de la glace des carottes issues de différentes profondeurs. Ils ont remonté jusqu'aux températures de l'atmosphère des différentes époques ;
- en analysant les petites bulles d'air emprisonnées entre les flocons de neige compressée des carottes. Ils ont chiffré la teneur en gaz carbonique CO_2 et des autres gaz à effet de serre (NO_2 et CH_4).

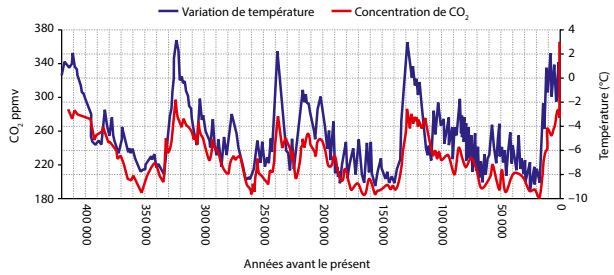


Figure 4

Analyses des données issues des carottes de glace de l'Antarctique.

La *figure 4* montre les résultats de ces analyses. En bleu, on a tracé l'écart de température autour d'une valeur moyenne allant de +2 à -8 °C, et en rouge la teneur en CO_2 de l'atmosphère.

Ces résultats sont fantastiques car ils montrent que depuis 400 000 ans ont alterné :

- des périodes de glaciation (-8 °C) où par exemple l'Europe était entièrement recouverte de glace ;
- des périodes chaudes (+2 °C) où toute la glace est fondue et les continents découverts et végétalisés sinon cultivés.

Un cycle s'est alors formé où tous les 100 000 ans se succèdent : une période chaude avec une teneur en CO_2 de l'atmosphère de l'ordre de 300 ppm puis une période très froide où la teneur de l'atmosphère n'est que de 200 ppm.

Les géologues montrent, de plus, qu'à chaque glaciation et réchauffement, le niveau des mers peut varier de plus de 100 mètres.

En 2016 nous sommes au sommet d'une période d'interglaciation (courbe bleue), avec cependant une teneur de l'atmosphère en CO_2 de 400 ppm qui n'a jamais été atteinte.

Le climat des derniers millénaires

Comment mesurer la température sur des périodes moins anciennes comme pour le dernier millénaire, le thermomètre n'ayant été inventé qu'au XVII^{e} siècle ? Les climatologues et les historiens ont dû trouver d'autres moyens comme :

- l'analyse des carottes de glace non plus aux pôles mais celles prélevées sur les grand glaciers montagneux comme ceux des Alpes ou de l'Himalaya ;
- la dendrochronologie qui étudie les cernes des arbres en anneaux de largeur plus ou moins grande en fonction des saisons, de la température et de l'humidité ;
- les archives et les écrits laissés par les villes, les paroisses, et les particuliers relatant la date des récoltes, des vendanges et leur abondance ou leur faible rendement.

La dendo-chronologie : il s'agit de l'étude des cernes et des anneaux des arbres. Quand un arbre pousse, son tronc s'élargit en fonction du temps, de la température, des pluies, etc. Il grossit plus ou moins. La largeur des anneaux est proportionnelle à ce qui lui a permis de grossir durant l'année, c'est un témoin des saisons et du climat.

Figure 5

Différentes méthodes pour retracer les climats anciens.

Remarque

Le premier véritable thermomètre aurait été inventé à Florence en 1654 par le grand- duc de Toscane, il s'agissait d'un instrument à alcool. L'invention des thermomètres modernes est attribuée au physicien allemand Daniel Gabriel Fahrenheit. En 1717, il remplace l'alcool par du mercure.

Deux exemples sont donnés dans les encarts ci-après.

Les archives écrites

Les historiens qui étudient les archives écrites depuis l'Antiquité ont mis en évidence les variations de température sur des périodes de notre ère en Europe, comme un petit âge glaciaire du XIVe au XIXe siècle et aussi vers l'an 1000 durant deux siècles une période chaude (plus chaude qu'actuellement) appelée « optimum médiéval ». Les archives religieuses et notamment les registres paroissiaux qui enregistraient les déficits de naissances et excès de décès sont révélateurs des phénomènes climatiques extrêmes. Les processions pour cause climatique sont nombreuses, par exemple la grande procession de Notre-Dame de Paris « pro pluvia » en 1694 est caractéristique de l'extrême sécheresse qui sévit fin XVIIe siècle en Europe. À partir de la seconde moitié du XVIIe siècle, les progrès de l'instrumentation scientifique, la création de l'Académie royale en France en 1780, la création de la société européenne de météorologie ont multiplié les observations météorologiques qui permettent de reconstituer le climat du passé. Elles rapportent les inondations de 1787 qui donnent de faibles récoltes de blé et le froid extrême de 1788 qui ruine les semis, le prix extrême des grains et la pénurie de pain qui en résulte en France peut expliquer en partie la révolution de 1789.

Les glaciers des Alpes

Le glacier d'Altech a montré des avancées et retraits qui ont accompagné l'optimum de l'âge de bronze, l'âge glaciaire du fer, l'optimum médiéval et le petit âge glaciaire de 1320 à 1850 sans oublier les effets des éruptions catastrophiques volcaniques qui se sont traduites par un refroidissement soudain de quelques années. L'observation du glacier d'argentière en 1850 et en 1967 montre la différence très importante entre la fin du petit âge glaciaire et la période de réchauffement que nous connaissons. L'histoire raconte qu'en 1850 les paroissiens d'Argentière organisèrent une grande procession pour que le glacier ne progresse plus car il allait détruire le village… le changement climatique les exauça !

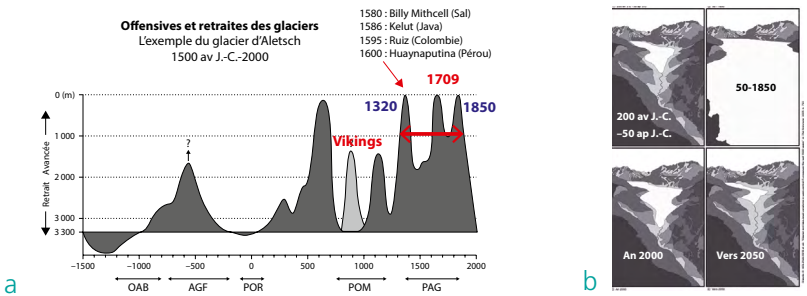


Figure 6

a) La frise chronologique des fluctuations du glacier d'Aletsch.
OAB : Optimum Âge du Bronze, AGF : Âge Glaciaire du Fer, POR : Petit Optimum Romain, POM : Petit Optimum Médiéval, PAG : Petit Âge Glaciaire. b) Phases et progression ou de recul des glaciers d'Aletsch.
Source : Garnier E., Les dérangements du temps, 500 ans de chaud et froids en Europe, Paris, Plon, 2010.

La période récente

L'optimum climatique médiéval correspond à une période de l'histoire, entre le X^e^ et le XIV^e^ siècle, qui fut inhabituellement chaude.

Après 1850 et le petit âge glaciaire, commence ce que l'on appelle la révolution industrielle qui est celle de l'accès à l'énergie pas chère et illimitée. Les machines à vapeur et machines électriques remplacent l'homme et le cheval. Le bois fait place au charbon, pétrole et gaz. Mais si cette évolution apporte un développement des richesses plus fort en un siècle qu'au cours des 2 millénaires précédents, la combustion de ces ressources fossiles dégage les gaz d'effet de serre et en particulier le CO_2.

Les études montrent clairement qu'entre 1800 et 2015, le gaz carbonique, le méthane et les oxydes d'azote ont nettement augmenté. Les analyses indiquent que ces augmentations sont imputables à 80 % à l'usage des combustibles fossiles qui s'est accéléré au cours des dernières décennies.

Remarque

Ces émissions accompagnent évidemment l'accroissement de population sur notre planète (un milliard en 1850 et six milliards en 2010), mais aussi le développement industriel des pays de l'Est et d'Asie.

La conséquence est une augmentation globale de la température de l'ordre de 0,8 °C depuis 1850 qui se répercute différemment suivant les régions et les latitudes.

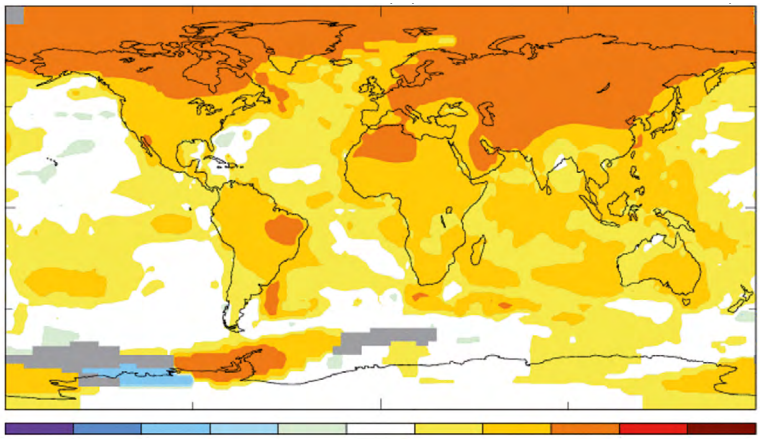


Figure 7

Réchauffement à travers le monde entre les périodes (1951-1980) et (1997-2012) : des changements observés en accord avec les prévisions donnent des preuves incontestables du phénomène de réchauffement climatique.

Les cartographies (*Fig. 7*) mettent en évidence des augmentations plus importantes :

- de 1 à 2 °C près des zones arctiques ;
- de 0,2 à 0, 5 °C dans les zones occidentales et africaines.

Ces variations de températures globales et locales induisent des changements comme par exemple :

- une sécheresse accentuée dans l'Afrique subsaharienne ;
- un réchauffement des saisons et une adaptation de l'agriculture ;
- l'augmentation du niveau des mers ;
- la fonte des glaces en Arctique et des glaciers en Europe.

Ces conséquences ont des répercussions sociales d'où l'importance des modèles pour essayer de comprendre ces évolutions et trouver d'éventuels moyens pour les parer ou en diminuer les effets.

Théories et modèles

Le GIEC

C'est le Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat qui est chargé par l'ONU d'évaluer les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique nécessaires pour comprendre les risques liés au réchauffement climatique d'origine humaine.

Autour d'un comité exécutif, 2 000 scientifiques ont travaillé sur des modèles numériques complexes prenant en compte les processus physiques qui règlent les comportements couplés de l'atmosphère et de l'océan à l'échelle de la planète.

L'hypothèse de base des modèles est que le réchauffement est dû aux gaz à effet de serre issus de l'usage des combustibles fossiles. Les experts se sont attelés à un scenario de prévisions très complexes : que faut-il faire pour que l'augmentation de température globale en 2100 ne dépasse pas un seuil de 2 °C, qui a été retenu lors de la conférence de Paris en 2015 (COP 21) ?

Les scénarios du GIEC

En un siècle, la température a augmenté de 0,8 °C. Depuis 1900, on émet du gaz carbonique en brûlant les réserves carbonées fossiles et cela s'est accéléré au cours des années, en 2015 on note plus de 10 Mrd de tonnes de CO_2. Plusieurs scénarios ont été donc bâtis par le GIEC.

ONU : Organisation des Nations unies

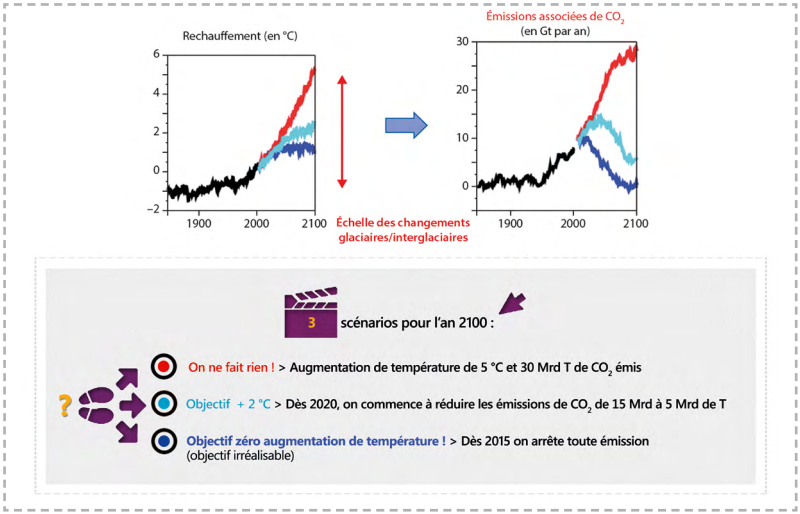
Remarque

Depuis 1990, le GIEC remet des rapports d'évaluation.
Le cinquième en 2014 a servi de base pour la COP 21 et les accords de Paris en 2015.

Le modèle numérique de climat est un logiciel qui simule l'évolution des différentes composantes du système climatique ainsi que leurs interactions. Ces modèles permettent d'améliorer notre compréhension des processus climatiques et sont essentiels pour estimer l'évolution future du climat.

Figure 8

Les scénarios du GIEC.



La *figure 8* résume trois situations qui conduisent à des élévations de températures distinctes :

- 5 °C en 2100 si on ne fait rien et si on émet 30 Mrd T de CO_2 par an ;
- 2 °C en 2100 si dès 2020 on commence à réduire de 15 à 5 Mrd de T de CO_2 ;
- 0 °C si dès 2015 on arrête toute émission (objectif irréalisable).

L'objectif de 2 °C que s'impose les États signataires implique de diminuer de 50 à 70 % les émissions, dès 2050, pour atteindre l'équilibre carbone. La situation peut être meilleure si on a recours à la captation et à la réutilisation du CO_2 par la chimie conduisant à des « émissions négatives ».

Les conséquences du réchauffement climatique

La température

Les modèles donnent la cartographie qui simule les élévations des températures des différentes zones de la planète virtuelle suivant les hypothèses d'émission qui se traduisent dans les calculs par des niveaux du forçage radiatif.

Les variations de température moyenne, en fonction des différents forçages radiatifs sont les suivantes :

- pour un forçage radiatif de 2,6 W/m^2 (correspondant au seuil de +2 °C en 2100), pour les zones de l'Europe occidentale, elles sont

comprises entre 1 et 1,5 °C. Il y a en revanche un fort réchauffement du pôle Nord provoquant la fonte des glaces ;

- pour un forçage radiatif de 8,5 W/m² (correspondant aux + 5 °C ou + 6 °C), aucune zone n'échappe au réchauffement avec une augmentation de plus de 10 °C pour l'Arctique et même 3 °C pour l'Antarctique.

Le niveau des mers

Il y a plusieurs façons de mesurer la variation du niveau des mers. Depuis longtemps dans les ports, on se sert des marégraphes qui mesurent les niveaux hauts et bas des marées chaque jour et permettent de faire des moyennes annuelles d'un niveau moyen. Depuis les années 1990, les mesures spatiales par altimétrie et lasers permettent de mesurer les variations globales et locales.

Les contributions à l'élévation des niveaux sont :

- l'expansion thermique (la dilatation) ;
- la fonte des glaciers ;
- les eaux continentales, principalement.

Depuis 1990, on mesure une augmentation de l'ordre de 2,5 à 3 mm/an ± 0,5 mm.

Dans les scenarios du GIEC, les projections pour 2100 vont de 40 à 75 cm. Il y aura sans doute des variations régionales différentes.

La dilation thermique est l'expansion à pression constante du volume d'un corps occasionnée par son réchauffement, généralement imperceptible.

Une étude dans la région Aquitaine montre que le cordon dunaire des Landes est attaqué avec un trait de côte qui peut reculer et l'estuaire de la Gironde soumis à submersion, alors que dans les Hauts-de-France, la Baie de Somme s'ensable.

Adaptation et conséquences économiques

Pour les populations, les conséquences sont diverses avec des répercussions inégales sur les ressources alimentaires et l'économie.

L'exemple de l'Afrique est particulièrement frappant (*Fig. 9*).

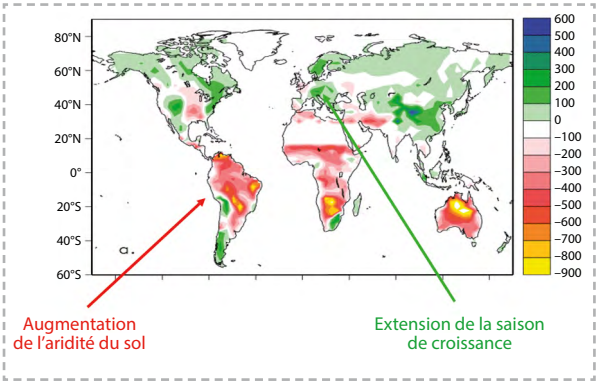


Figure 9

Modélisation simple de la production de végétation au travers des continents en réponse au réchauffement climatique.

Les régions intertropicales sont affectées de façon négative, les zones désertiques s'étendent, la végétation souffrira et les terres deviendront plus arides, ce qui peut entraîner des famines et perpétuer la sous-alimentation des populations.

En revanche, dans les régions extratropicales (Europe occidentale, États-Unis, Canada, Chine), la croissance de la végétation va s'améliorer. Il est clair que la culture, l'agriculture et la viticulture sauront alors s'adapter aux variations climatiques.

La prise en compte des variations naturelles

Si près de 90 % des scientifiques et plus encore des journaux sont convaincus que le changement climatique est dû au gaz à effet de serre et notamment au CO_2, un nombre non négligeable parmi les scientifiques et historiens du climat pensent que ce changement n'est pas seulement dû au CO_2 mais que les évolutions naturelles de la planète sont aussi à prendre en cause.

Une courbe en forme de crosse de hockey est une représentation graphique de l'évolution des températures mondiales sur le second millénaire. Elle montre une diminution lente et régulière de la température de 1000 à 1900, avant une remontée brutale.

Ils ne nient pas les augmentations de concentration des gaz CO_2, CH_4, N_2O mais discutent en se basant sur des variations naturelles de la planète, des oscillations des océans et des cycles solaires, de la validité des extrapolations du climat du futur du GIEC.

La température

Les courbes en forme de crosses de hockey (*Fig. 10*) ne prennent pas en compte des résultats plus complets mêlant les analyses isotopiques ainsi que la dendrochronologie et l'analyse de sédiments pour les derniers millénaires.

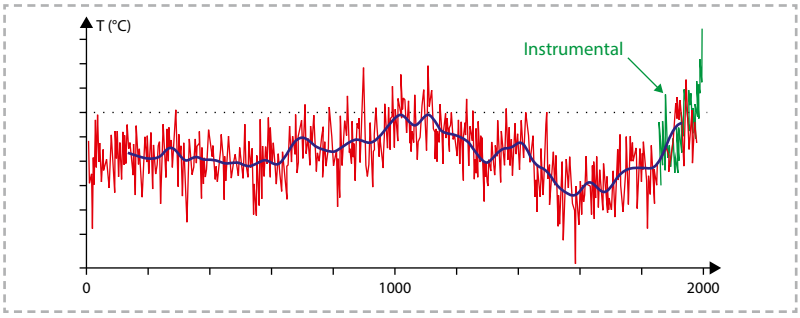


Figure 10

Évolution de la température relative de l'an 0 à l'an 2000. Courbe bleue : moyenne des températures sur 10 ans, courbe rouge : températures déduites par carottages et écrits anciens, courbe verte : mesures réelles (thermomètres puis satellites).

Les paléoclimatologues, en accord avec les historiens, mettent alors en évidence le petit âge glaciaire du XIVe au XIXe siècle précédé par un optimum climatique médiéval vers l'an 1000, précédée par une période plus froide qui suivait une période plus clémente au temps des Romains.

Ceci fait soupçonner un cycle de 1 000 ans pas vraiment dû aux émissions de gaz carbonique qui au Xe siècle, n'avaient rien à voir avec celles du XXe siècle.

Les données des relèvements des températures depuis 1998 (valeur élevée comme à chaque année de l'apparition d'un courant du pacifique dit *El Nino*) semblent plutôt stables et ne coïncident pas avec les extrapolations.

De même, l'évolution de l'anomalie de température dans la troposphère, étudiée par des mesures satellites et par des ballons sondes, est nettement plus basse que celle prévue par les modèles (*Fig. 11*). Il y a donc un certain nombre d'experts du climat qui contestent les projections de température du GIEC et pensent qu'il faut encore des études complémentaires sur un sujet aussi complexe.

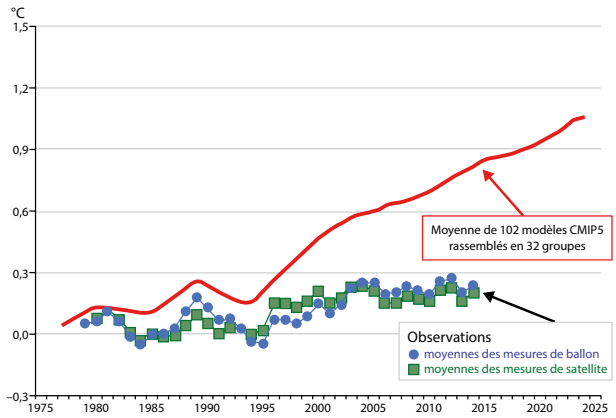


Figure 11

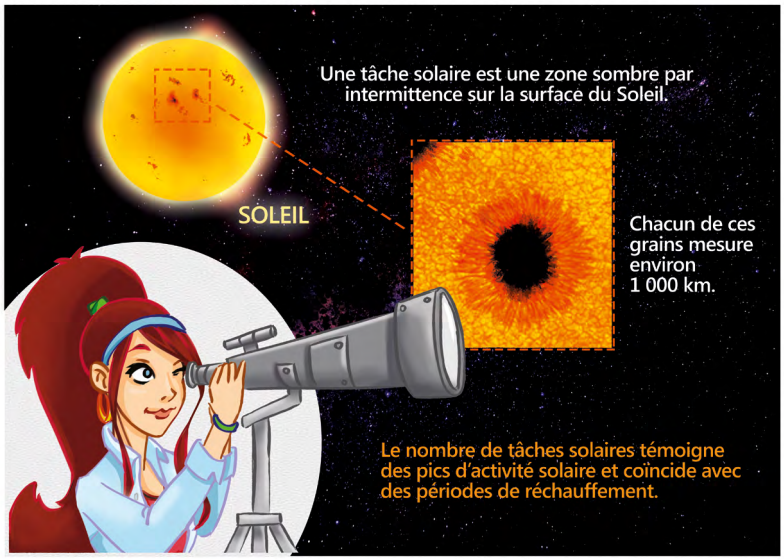
Évolution de l'anomalie de température dans la troposphère moyenne entre 1975 et 2025 par des mesures de ballons et par des mesures de satellites. Comparaison entre les modèles et les observations. Toutes les courbes (moyennes sur cinq ans) partent de zéro en 1979. Source : J.R. Christy, Univ. Alabama.

L'activité solaire

Les observations du Soleil permettent de suivre les taches solaires qui sont plus ou moins abondantes en fonction des années.

Figure 12

Les tâches solaires.

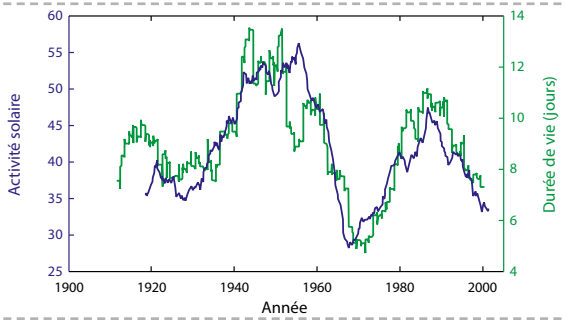


Remarque

Depuis les années 1600, les astronomes ont régulièrement noté le nombre de taches qui suivent un cycle de onze ans et qui sont en relation avec l'activité du Soleil.

Figure 13

Évolution de l'activité solaire et de la variabilité (ou durée de vie) de la température aux Pays-Bas de 1910 à 2000. Ces deux courbes suivent des variations très proches. Source : Le Mouël *et coll.* (2009).



Durant la deuxième moitié du XVII^{e} siècle, on note la quasi absence de taches, ce déficit correspond à une période très froide ; de même après 1800, un minimum est observé avec une activité solaire réduite, qui correspond à un petit âge glaciaire (*Fig. 13*).

Au contraire, au XX^{e} siècle, les cycles sont nettement plus importants. Un certain nombre de géophysiciens et astrophysiciens relient l'activité solaire à la variabilité de la température.

Le niveau des mers

Depuis les années 1990, grâce aux mesures altimétriques des satellites, on sait que l'élévation moyenne du niveau de la mer est d'environ

3 mm/an. Grâce aux marégraphes, on sait aussi que le niveau moyen global s'est élevé de 20 cm au XX^{e} siècle, soit environ 2 mm/an.

Cette accélération est-elle significative ou doit-on la considérer comme des variations naturelles comme on le constate sur la courbe de la *figure 14* ?

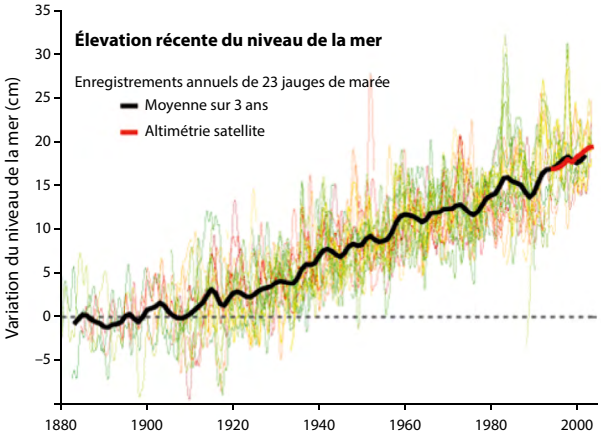


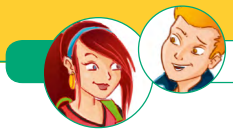
Figure 14

Variation du niveau de la mer depuis 1880. Courbe noire : moyenne sur trois ans obtenue à partir des mesures marégraphiques ; courbe rouge : mesures satellites.

Les experts dénotent des segments à pentes diverses positives ou négatives représentatifs de ralentissements ou d'accélérations. C'est dire qu'à la fin du XXI^{e} siècle, le niveau aura peut être augmenté de plus de 20, 30 ou 40 cm et qu'il faudra notamment pour l'habitat atlantique ou méditerranéen s'y adapter.

Conclusion

Le changement climatique n'est plus à démontrer et les analyses montrent clairement en ce début de XXI^{e} siècle, un réchauffement dû aux émissions de gaz à effet de serre. Certains modèles prennent plus en compte les variations naturelles et les cycles océaniques et solaires pour expliquer ces changements. Quelles qu'en soient leurs origines, les chimistes que nous sommes, pensons que ce n'est pas la peine d'ajouter des milliards de tonnes de CO_2 à celles déjà existantes dans l'atmosphère, en brûlant bêtement nos ressources fossiles de pétrole, gaz et charbon. Il y a mieux à faire en poussant les recherches sur les énergies renouvelables et la chimie végétale.



DE LA FORCE MUSCULAIRE AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES

L'énergie a différentes formes et représente ce qui est dépensé lorsque l'on observe des transformations :

- énergie mécanique lorsqu'un objet se déplace ;
- énergie thermique lorsqu'un objet modifie sa température ou lorsqu'un corps change d'état (évaporation, condensation, sublimation, cristallisation) ;
- énergie chimique lorsque la nature des corps se transforme (combustion, réaction chimique).

L'énergie est nécessaire à la vie puisque celle-ci n'est qu'une suite de transformations et de mouvements. Elle est donc nécessaire à l'existence de l'Homme et son origine est le Soleil grâce à son rayonnement.

Une brève histoire de l'énergie

L'énergie est nécessaire à l'activité de l'homme qui vient d'abord du corps humain (le cerveau, les muscles) qui tire lui-même son énergie de son alimentation, elle-même le produit de l'agriculture rendue possible par le rayonnement solaire.

L'Homme, tout au long de son histoire, a découvert et développé différentes formes d'énergie et les a utilisées dans l'évolution de ses sociétés. Les *figures 2 et 3* résument de la préhistoire à nos jours les grandes périodes énergétiques et leurs applications.

Figure 1

Les énergies de l'ancien temps : la traction animale ; les roues à aubes ; les moulins.

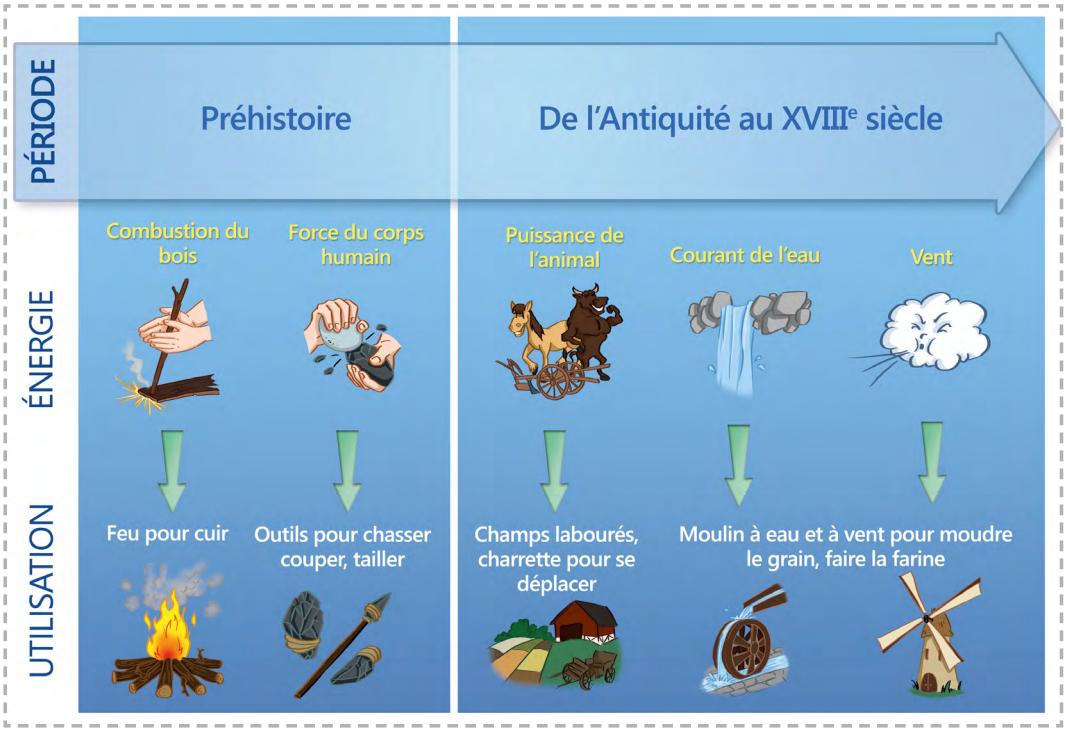


Figure 2

Au cours du temps, l'Homme a trouvé de nouveaux moyens de produire de l'énergie. Cela lui a ouvert de nouvelles possibilités techniques.

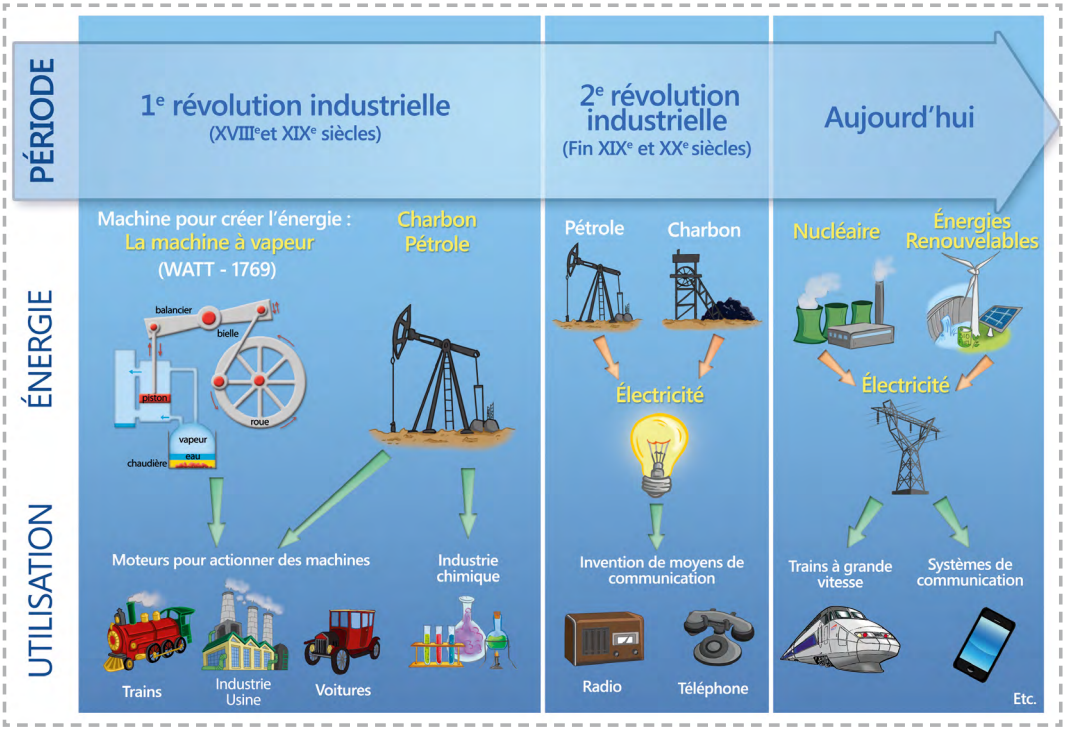


Figure 3

Depuis deux siècles, on découvre des moyens extraordinaires de produire de l'énergie ou de la domestiquer – l'électricité par exemple. Le développement technologique actuel (transports, communication, etc.) en est la conséquence.

L'énergie d'aujourd'hui

Depuis la deuxième révolution industrielle, on consomme tous beaucoup trop d'énergie. Progressivement, la source d'énergie privilégiée est devenue le pétrole, qui est facilement transportable et convient bien aux moyens de transport motorisés.

Par ailleurs, l'industrie s'est fortement développée (les transports, les bâtiments, l'éclairage, le vêtement, la fabrication des téléphones, etc.) et requiert énormément d'énergie.

Pendant longtemps, tout s'est passé comme si le pétrole était inépuisable sur la Terre. Aujourd'hui, on comprend que ce n'est pas vrai : en 50 ans, l'homme a extrait du sous-sol de la planète la moitié du pétrole qui y était contenu. On sait que l'on ne pourra pas continuer

à l'exploiter au même rythme. Comment faire avec notre civilisation basée sur le pétrole alors que celui-ci menace de faire défaut ?

Figure 4

Le pétrole s'épuise. Il faut inventer autre chose et changer nos habitudes de vie.

Une grosse difficulté vient de notre utilisation d'énergie : c'est la pollution. Le charbon, le gaz, le pétrole produisent du gaz carbonique (CO_2) quand on les utilise. Ce gaz carbonique est peut être à l'origine du réchauffement du climat qui vient perturber toute notre planète – et on voudrait ne plus en produire.

Figure 5

Toutes les activités humaines nous polluent. Il s'agit de maintenir cette pollution aux niveaux les plus faibles possibles.

Face à ces deux problèmes, nous devons trouver des solutions pour pérenniser notre consommation d'énergie – et donc notre civilisation.

Inventaire des moyens de production d'énergie

Les sources fossiles

Une énergie fossile est une énergie dont les réserves se sont constituées voilà très longtemps. Elles proviennent de l'évolution géologique des forêts et sont donc enfouies. Elles sont présentes en quantités finies et s'épuisent donc au fur et à mesure de leur exploitation.

Elles proviennent de la transformation géologique de matières végétales depuis des dizaines voire des centaines de millions d'années :

- du pétrole ;
- du charbon ;
- du gaz.

Toutes ces sources d'énergie (gaz, pétrole) devront à plus ou moins long terme être remplacées car leurs combustibles vont progressivement disparaître de la Terre. Il en est de même des centrales nucléaires. Elles dépendent de l'uranium qui sans être une matière fossile est en quantité limitée (dont épuisable) sur la Terre.

Remarque

L'énergie nucléaire provient de l'uranium (extrait de la croûte terrestre) qui dégage de l'énergie lorsqu'un atome fissile se casse ; cette énergie est utilisée dans les centrales nucléaires pour chauffer de la vapeur d'eau et faire tourner des turbines pour produire de l'électricité (voir encart « Produire l'électricité grâce à un alternateur et une turbine »). L'uranium est un minéral ; il provient de la croûte terrestre, mais n'est pas une matière fossile.

Les énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se constitue ou se reconstitue plus rapidement qu'elle n'est utilisée. Elle est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps (échelle humaine).

Elles sont utilisées aujourd'hui de façon minoritaire mais très prometteuse. Ces sources d'énergies sont :

- l'eau ;
- le vent ;
- le Soleil.

La nature donne un exemple : l'énergie de la vie provient du Soleil qui permet de transformer les molécules et fournit l'énergie chimique à la base de la vie.

On peut mimer ces procédés et de ce fait tirer avantage de différentes sources d'énergie :

- **la biomasse**, ce terme désigne toute la matière qui provient des organismes vivants ;

- la force de l'eau des rivières, **l'énergie hydraulique** ;
- le vent, l'**énergie éolienne,** pour faire tourner des turbines (voir encart « Produire l'électricité grâce à un alternateur et une turbine ») ;
- le Soleil, **énergie solaire** ;
- des sources d'énergie qui viennent de la mer, les **énergies marines**, les marées, les courants marins profonds qui sont capables eux aussi de faire tourner des turbines (ces énergies sont encore au stade de l'expérimentation).

Les énergies renouvelables sont-elles à la hauteur de nos besoins ?

Nous avons à notre disposition plusieurs sources d'énergie renouvelable qui sont développées dans ce paragraphe. L'enjeu pour se substituer aux sources d'énergie fossiles est de répondre à nos besoins colossaux.

L'énergie hydraulique

Les rivières sont déjà largement équipées et pratiquement, saturées (tout au moins en Europe) pour la production d'électricité (hydroélectricité).

Les **énergies marines** resteront utilisées à très petit niveau car elles sont encore à titre expérimental pour longtemps.

Les sources hydrauliques ne sont pas suffisantes mais de nouvelles énergies sont prometteuses telles que **la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie solaire**.

La biomasse (énergies vertes)

À l'origine, la Terre ne contient pas d'organisme vivant, mais une atmosphère faite de gaz carbonique (CO_2) et d'eau. Par un mécanisme que l'on appelle **la photosynthèse**, la lumière du Soleil est capable de fabriquer des molécules organiques à partir de ces éléments.

Remarque

On peut dire que l'énergie du Soleil est stockée dans les organismes vivants sous forme d'énergie chimique.

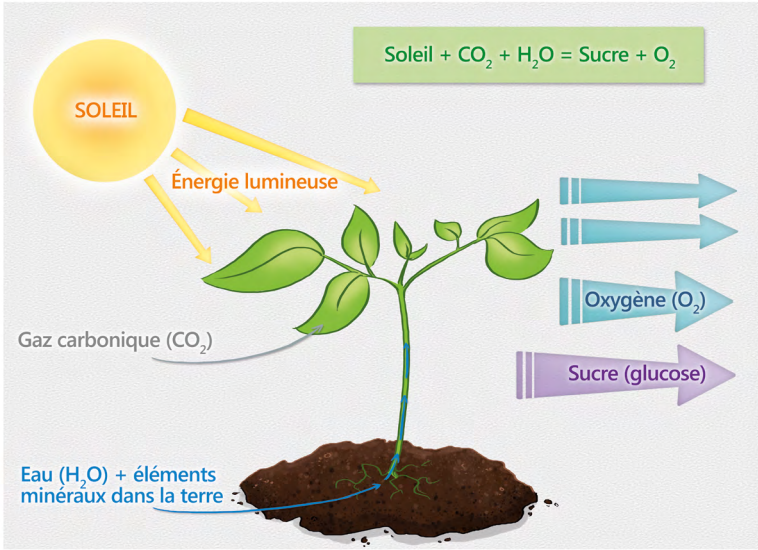


Figure 6

L'énergie verte. Grâce au Soleil, les molécules de l'atmosphère se transforment et permettent la vie. Des mécanismes analogues permettent de faire de nouvelles molécules, comme celles qui constituent des carburants pour l'activité humaine.

Ayant compris ces mécanismes de la vie, les chimistes peuvent les reproduire sur des systèmes qui les intéressent.

En particulier, ils ont développé des techniques pour fabriquer des carburants (hydrocarbures) à partir de la matière végétale (la biomasse).

La matière végétale utilisée a plusieurs origines :

- des plantes cultivées spécifiquement (*Fig. 7*) ;
- des déchets agricoles et forestiers (*Fig. 7*) ;
- des algues ou des microorganismes.

Chacune de ces voies de synthèse de biocarburants a de nombreuses variantes dans ses procédés chimiques. Une recherche industrielle intense est actuellement consacrée à la question.

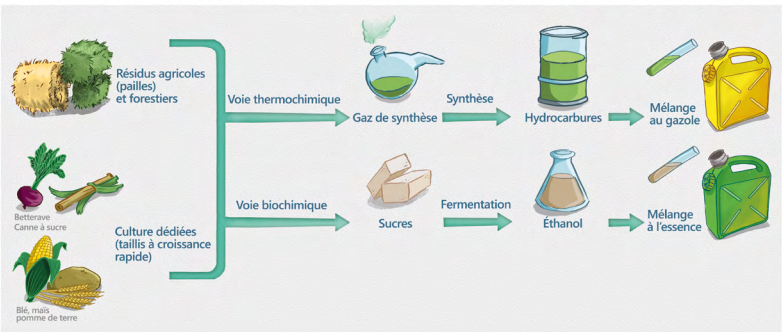


Figure 7

Schéma des procédés d'utilisation de la biomasse. On peut faire pousser des plantes spécifiques choisies pour la production de carburants (cultures dédiées) ; on peut aussi utiliser les déchets forestiers ou agricoles.

L'énergie éolienne

Les moulins existent depuis l'Antiquité. C'est le vent (l'énergie éolienne) qui fait tourner les ailes pour entraîner des machines tournantes.

Autrefois, des engrenages étaient utilisés pour moudre le grain et produire de la farine ou pour faire tourner des poulies et remonter l'eau d'un puits.

Aujourd'hui, les « moulins modernes » font tourner des turbines qui produisent de l'électricité : c'est l'électricité éolienne (voir encart ci-après).

Produire l'électricité grâce à un alternateur et une turbine

Il est possible de transformer l'énergie mécanique de l'eau ou du vent en énergie électrique grâce au principe illustrée sur la *figure 8*.

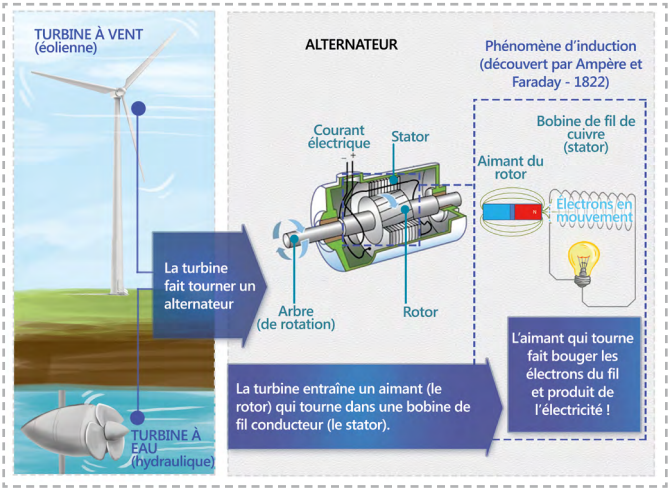


Figure 8

L'alternateur transforme l'énergie mécanique (rotation d'une roue sous l'effet d'un courant liquide ou gazeux) en énergie électrique. C'est l'élément de base des centrales électriques à charbon, gaz ou pétrole ainsi que des centrales nucléaires et des éoliennes.

Un aimant mis en mouvement dans une bobine de fil de cuivre produit du courant électrique. C'est le phénomène de l'induction, découvert par Ampère et Faraday il y a presque deux siècles. Il est à la base de toutes les installations génératrices d'électricité.
L'alternateur est une machine qui remplit précisément ce rôle : un aimant cylindrique tourne à grande vitesse dans une bobine de cuivre : on recueille le courant aux bornes de cette bobine.
L'aimant de l'alternateur est entraîné par une turbine. Le principe est celui d'une roue à aubes, mise en mouvement par un courant d'eau (hydraulique) ou d'air (éolien). L'axe de cette roue est l'aimant de l'alternateur. Exemple de vitesse de rotation : 1 500 tours par minute.

Une source d'énergie doit être dimensionnée de façon raisonnable selon certains critères : une petite éolienne qui ferait fonctionner une lampe de poche serait une absurdité… beaucoup trop chère.

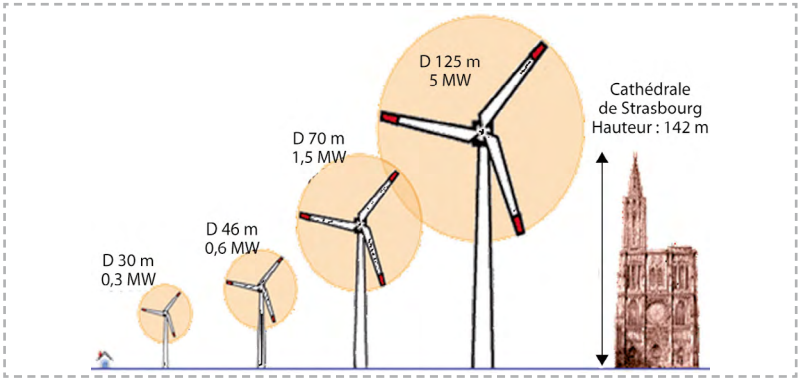
Pour une source d'énergie éolienne praticable, on utilise des éoliennes (moulins) de très grandes tailles que l'on regroupe en grand nombre sur un site : ce sont **les « fermes éoliennes ».**

On envisage pour les éoliennes des dimensions colossales (*Fig. 9*) de l'ordre d'une centaine de mètres de hauteur (c'est la hauteur du premier étage de la Tour Eiffel) ou plus.

Les difficultés technologiques sont très importantes : par exemple construire des mâts d'une telle hauteur, dans des sites choisis pour que le vent y souffle fort, et éviter qu'elles ne soient arrachées par le vent. La chimie a développé des matériaux (aciers spéciaux, aluminium adaptés) conçus pour résister à ces conditions.

Figure 9

La puissance des éoliennes est proportionnelle à la surface balayée par les pales.



Remarque

Une « ferme éolienne » produit environ 3,5 watts électriques par m².

Une caractéristique fait que la production d'énergie éolienne ne ressemble pas à celle d'une centrale à pétrole ou nucléaire : c'est le **phénomène de la dilution**. Il signifie que l'installation de production va occuper une place beaucoup plus considérable sur le sol : on doit éloigner les éoliennes les unes des autres pour ne pas perturber les courants gazeux et profiter de bonnes conditions de production.

Les éoliennes exigent beaucoup de place : installées à grande échelle, elles dégradent les paysages.

Pour éviter cette difficulté, on construit des éoliennes sur la mer – ce sont **des « fermes marines »** comme celle représentée sur la *figure 10* qui montre une partie d'une ferme éolienne marine construite en Hollande.

Remarque

On calcule que pour assurer toute la consommation électrique de la France, il faudrait des éoliennes sur une bande de cinq kilomètres de large, le long de toutes les côtes françaises.

L'investissement industriel est très coûteux et très difficile à exploiter. En effet, les productions des centaines d'éoliennes de la ferme doivent être acheminées par voie de câbles sous-marins vers des stations électriques de hautes puissances.

Figure 10

Vue d'une ferme éolienne marine installée en Hollande (off-shore).

Remarque

L'implantation de fermes éoliennes est très avancée dans des pays comme le Danemark, l'Espagne ou l'Allemagne – où l'énergie éolienne est considérée comme rentable.

L'effet photovoltaïque

Le Soleil est avec le vent (et à un moindre degré la biomasse) la principale source d'énergie renouvelable dont l'exploitation se fait à grande échelle. Ceci est en particulier dû à l'existence de « l'effet photovoltaïque » qui permet de recueillir de l'électricité à partir d'un matériau irradié par le Soleil.

Remarque

En France, en janvier 2015, l'éolien assure environ 2,2 % de la production d'énergie électrique.

Les différents types de conduction électrique

Un corps solide peut être isolant, conducteur ou semi conducteur. C'est sur cette notion que repose l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'électricité. La *figure 11* schématise les différentes situations dans lesquelles les électrons des atomes peuvent se trouver :

– Ils peuvent être très fortement reliés au noyau de l'atome et ne sont pas affectés par leurs voisins (on les appelle électrons des couches profondes) ; c'est le cas des électrons des atomes de carbone du diamant par exemple, qui ne peut donc conduire l'électricité et constitue un excellent isolant.

– Ils peuvent être en contact avec leurs voisins et former avec eux des liaisons chimiques – ce sont les électrons de valence – qui rendent compte de l'existence même des corps solides ou des molécules.

– Dans un troisième cas les électrons les moins liés à leur noyau peuvent être délocalisés sur l'ensemble du corps solide et assurer la conduction de l'électricité, puisque celle-ci n'est rien d'autre qu'une circulation des électrons d'un bout à l'autre d'un corps conducteur. Les métaux sont la catégorie de solides la plus connue où ce phénomène de conduction intervient. Une certaine quantité d'électrons circulent en permanence dans ce qu'on appelle la bande de conduction (voir *figure 12*).

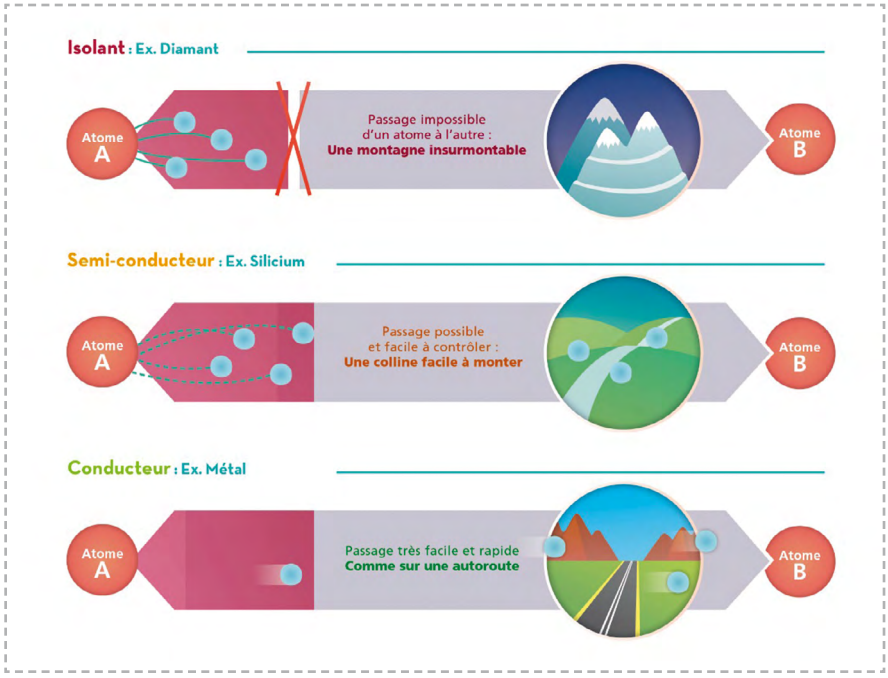


Figure 11

Principe de circulation des électrons externes entre les bandes de valence et de conduction.

Les semi-conducteurs possèdent des électrons aux propriétés intermédiaires. Sans excitation extérieure – par exemple à très basse température ou dans l'obscurité, ils restent dans les couches profondes ou dans la bande de valence. Si on leur apporte un peu d'énergie, par contre, par exemple en les chauffant ou en les soumettant à une tension électrique ou encore – c'est ce qui va nous intéresser ici – en les soumettant à une irradiation lumineuse, ces électrons quittent la bande de valence pour aller peupler la bande conduction. Sous excitation (irradiation par la lumière, par exemple), ces corps isolants deviennent conducteurs.

Ce comportement est résumé sur la *figure 11*. Le diamant y est pris comme prototype de l'isolant et le silicium comme prototype du semi-conducteur. Ce corps a en effet d'excellentes propriétés de semi- conduction et c'est celui qui est le plus utilisé (mais pas le seul) pour capter l'énergie solaire.

Ceci vient de la propriété suivante. On peut résumer la *figure 11* en introduisant la notion de distance entre la bande de valence et la bande de conduction qui permet de comprendre le comportement des solides sous irradiation par la lumière (*figure 12*). Pour le diamant, cette distance (qu'on appelle le « gap » en utilisant un mot anglais) est plus grande que l'énergie de la lumière : donc l'irradiation n'a pas d'effet sur la conduction. Pour le métal, cette

distance est nulle et la lumière ne produit donc également aucun effet. Le semi-conducteur est dans une situation beaucoup plus intéressante : si on l'irradie par une lumière de faible énergie (on dit de grande longueur d'onde) les électrons de la bande de valence ne pourront pas être affectés, rien ne se passera. Pour une lumière d'une énergie supérieure à l'intervalle entre bande de valence et bande de conduction (le gap) en revanche, la lumière va effectivement se coupler aux électrons de valence, peupler la bande de conduction et permettre le passage d'un courant électrique par le semi-conducteur.

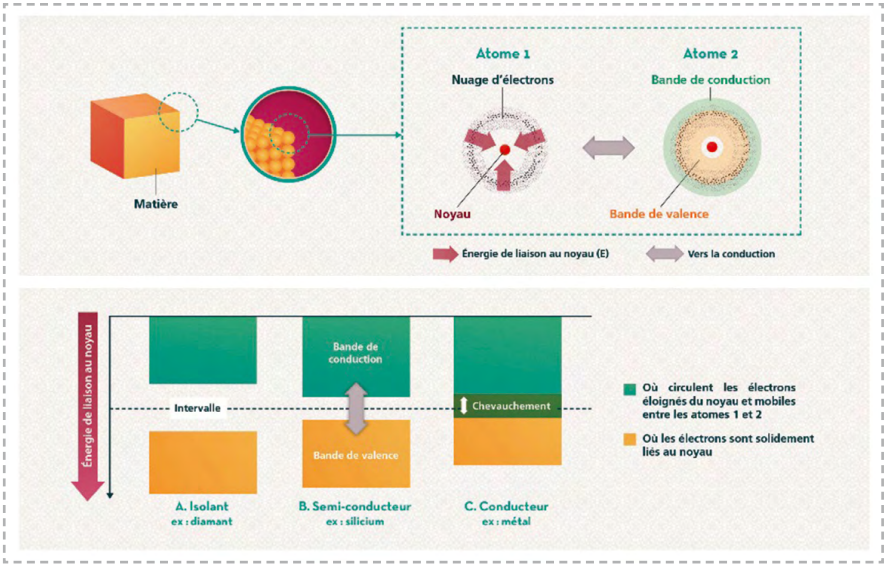


Figure 12

Niveaux d'énergie des électrons dans un solide. Il existe plusieurs situations qui expliquent l'existence de composés isolants électriques, conducteurs métalliques, semi-conducteurs.

L'encart « Les différents types de conduction électrique » permet de comprendre le principe de la cellule photovoltaïque.

Le « gap » du silicium est adapté à l'énergie de la lumière solaire si bien que les dispositifs au silicium éclairés par la lumière du Soleil voient leur bande de combustion se peupler d'électrons, et produisent le courant électrique que l'on recherche.

Photovoltaïque : photo = lumière ; volt = électricité, désigne la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique

Figure 13

Dans le silicium cristallisé, chaque atome Si est lié à quatre autres atomes identiques de façons équivalentes. Les électrons responsables de ces liaisons sont représentés sur le schéma de gauche.

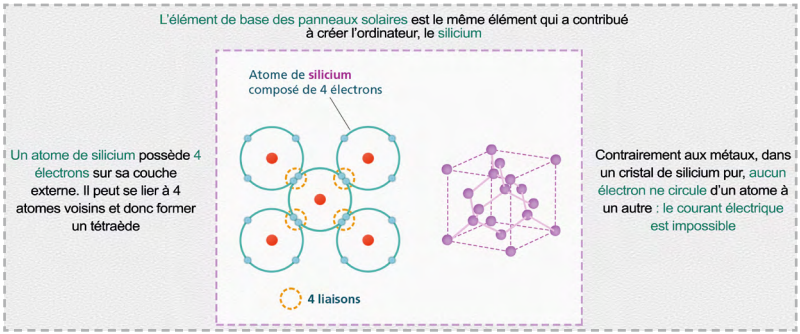
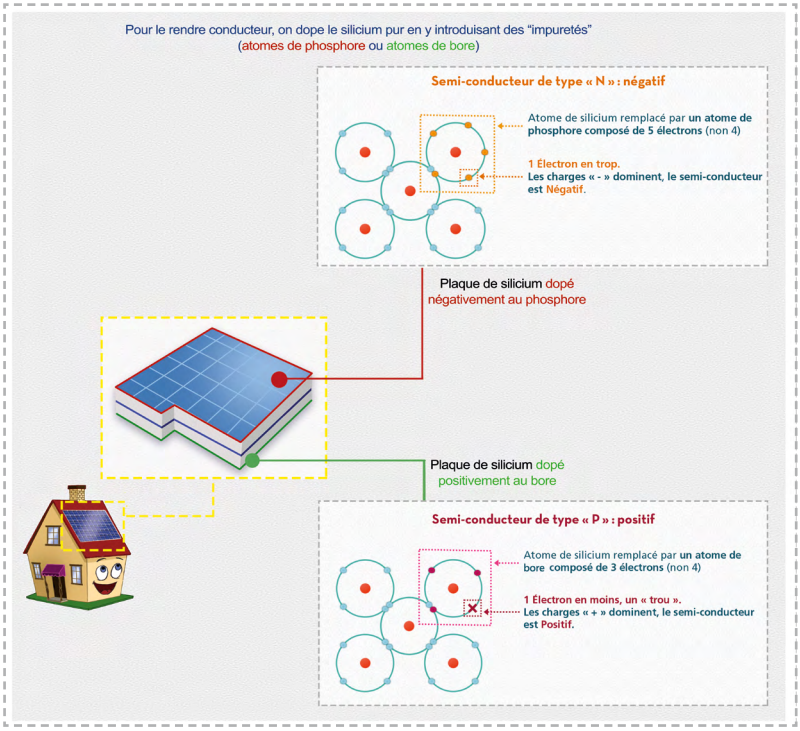


Figure 14

Le « dopage » du silicium introduit des électrons ou des « trous » supplémentaires selon qu'il correspond à une impureté de phosphore ou de bore. Ces charges (négatives ou positives) peuvent engendrer un courant électrique (conduction). Cet effet est à la basse de l'utilisation du silicium pour convertir le rayonnement solaire en électricité.



Sur la *figure 15*, on peut voir que le rayonnement solaire irradie la face avant de la cellule ; une différence de potentiel avec la face arrière apparaît qui permet de générer le courant électrique. Le schéma correspond à l'utilisation du silicium sous forme cristalline. C'est la « filière historique » dont le rendement maximum est de 25 % (au mieux le quart de l'énergie lumineuse est transformé en énergie électrique).

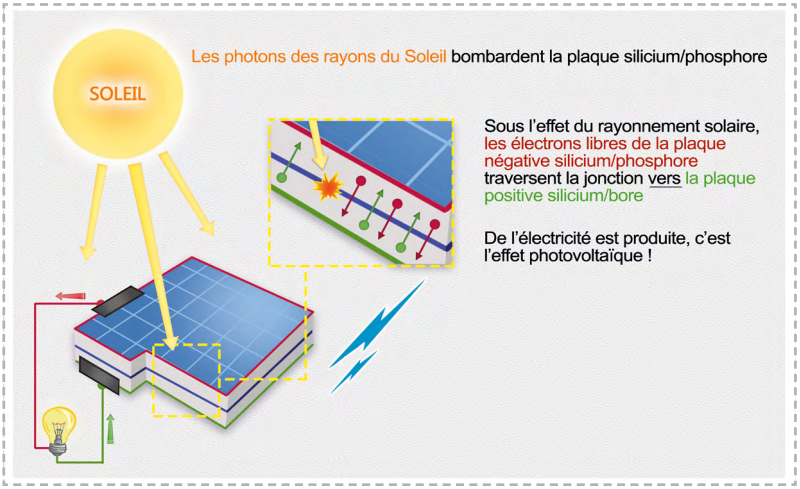


Figure 15

L'irradiation de la cellule photovoltaïque par le Soleil crée un courant électrique dans le circuit branché.

Bien que les solutions actuelles soient déjà satisfaisantes, d'intenses recherches se développent sur d'autres types de **cellules photovoltaïques** dans le but d'améliorer le rendement et les coûts.

La chimie est au cœur de ces développements qui consistent à fournir et tester de nouvelles techniques de fabrication et de nouveaux matériaux tels que :

- silicium amorphe après le silicium cristallin ;
- techniques de dépôts en couches minces ;
- nouveaux types d'alliages.

La « **dilution** » qui comme évoqué plus haut est importante pour l'éolien, l'est également pour le solaire.

Pour produire 1 000 Mégawatts, les densités de production sont :

- pour l'éolien :
  – 142 km², éoliennes terrestres (soit l'équivalent d'un terrain de 12 km sur 12 km)
  – 80 km², éoliennes maritimes ;
- pour une centrale thermique :
  – 0,32 km² ;
- pour le solaire (photovoltaïque) :
  – 32 km².

Les installations d'énergie solaire, qui demandent des surfaces très importantes, regroupent de grandes quantités de cellules. On peut voir sur la figure 16 quelques réalisations d'installations industrielles (bâtiments publics) utilisant des cellules photovolaïques en couches minces sur verre.

Figure 16

Installations à énergie solaire :
a) ferme solaire dans les Landes (Cestas) ;
b) stade aux États-Unis ;
c) bâtiment public dans l'Ohio, aux États-Unis.

a b c

L'intermittence des énergies éolienne et solaire

Figure 17

L'intermittence des énergies renouvelables reste un vrai problème.

Les énergies éolienne et solaire proviennent de sources « gratuites » – le vent et le Soleil. Mais ces sources ne sont pas fiables. **Ce phénomène s'appelle intermittence** et il conditionne l'utilisation de ces énergies (voir chapitre « Le challenge de l'électricité verte »).

Développer les énergies renouvelables, c'est donc aussi envisager les moyens de **stocker l'énergie électrique produite**. Cette question est l'une de celle qui ralentit le plus le développement des énergies renouvelables (voir chapitre « Le challenge de l'énergie verte »).

À défaut de savoir stocker l'énergie électrique de façon praticable, on maintient en service de « vieilles » centrales électriques – par exemple à charbon.

Ces centrales s'allument rapidement « à la demande » lorsque les sources renouvelables cessent de fonctionner et permettent de satisfaire le consommateur. À ceci près que leur coût vient s'ajouter à celui

des centrales renouvelables et qu'elles ne permettent pas de réaliser la diminution escomptée de pollution atmosphérique par le CO_2.

L'adaptation de la production d'électricité à l'intermittence de ces sources d'énergie déclenche de gros programmes de recherche scientifique et technique pour stocker l'énergie. Ces questions sont présentées dans le chapitre « Stockage de l'énergie électrique » de ce volume.

Les économies d'énergies

Le bon marché relatif des sources d'énergie fossiles, du charbon au gaz et au pétrole, nous éloigne tous des économies : on éclaire des locaux vides, on chauffe les résidences et les bureaux, ou on les refroidit selon la saison, avec de moins en moins de parcimonie.

Par ailleurs, les procédés de fabrication des produits de consommation ne regardent pas à la dépense d'énergie et le gaspillage des produits est considérable.

Avec des changements pas forcément très astreignants de nos habitudes de vie, on pourrait consommer nettement moins d'énergies (peut-être 20 % en moins). Depuis quelques années, des campagnes de communication font appel aux économies d'énergie.

Il est clair que les contraintes sur l'énergie devenant plus importantes, ce facteur « économie d'énergie » sera de plus en plus pris en compte. On voit déjà se multiplier des initiatives (campagnes citoyennes sur le tri des déchets par exemple) qui poussent aux économies d'énergie.

Conclusion

Les énergies renouvelables ont de nombreux atouts pour répondre à nos besoins énergétiques mais ne pourront pas à elles seules, dans l'immédiat, répondre à nos besoins actuels. Le défi du futur pour les énergies renouvelables ne pourra pas se dispenser d'une diminution de notre consommation et d'un changement de nos modes de vie.

POUVONS-NOUS DISSOCIER L'ÉNERGIE DE L'EAU ?

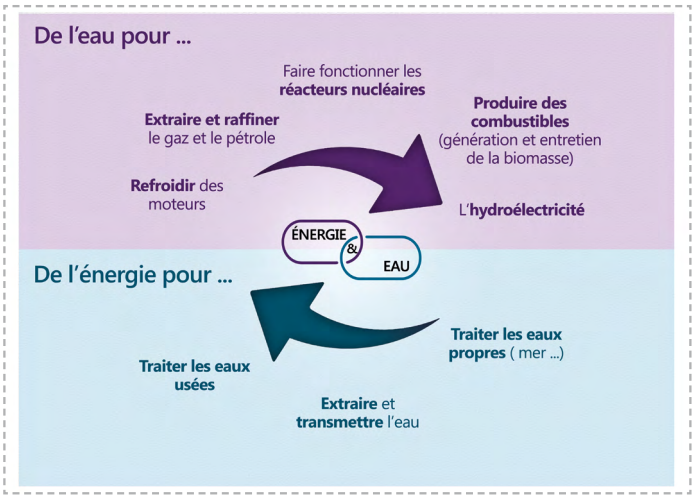
L'énergie, celle qui nous chauffe, celle qui fait déplacer les voitures et les avions, celle qui fait fonctionner nos usines, notre télévision et nos portables, celle qui nous éclaire la nuit… peut avoir des sources différentes mais dans la majorité des cas, indépendamment de la source, **elle a besoin d'eau**.

Ainsi, la consommation en eau comme la consommation en énergie, est un bon indicateur du niveau de vie d'un pays ou d'une région.

En quoi l'eau est utile pour la production d'énergie ?

Figure 1

L'eau est indispensable pour produire de l'énergie.



Le secteur de l'énergie est sans doute le secteur industriel consommateur d'eau le plus important.

La *figure 1* schématise le cycle de l'eau utile pour l'énergie.

Refroidissement des moteurs à combustion : exemple de la voiture

Le circuit de refroidissement a comme rôle de restituer à l'atmosphère une grande partie de la chaleur produite à l'intérieur de la chambre de combustion. Environ 45 % de l'énergie libérée lors de la combustion est transformée en énergie mécanique qui va mouvoir les arbres de la transmission puis les roues.

Le reste de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur qui va pour une part être évacuée à travers le pot d'échappement (environ 35 %) alors que le reste de la chaleur va se repartir sur les parois du moteur. Il faut vite refroidir car les matériaux risquent d'être endommagés.

C'est là que nous avons besoin des liquides de refroidissement fabriqués à base d'eau, lesquels grâce à un radiateur vont évacuer progressivement le restant de la chaleur.

Figure 2

Les machines, tout comme l'Homme, ont besoin de liquide pour se refroidir…

L'Homme et le moteur, un même besoin : une eau douce et propre.

Comme pour l'Homme, l'eau utilisée par le circuit de refroidissement des moteurs doit être douce et propre ; une exigence en plus pour l'Homme, elle doit être potable.
Alors que l'eau des mers et océans représente 97,3 % des réserves sur Terre (*Tab. 1*), nos nobles dispositifs de refroidissement ne supportent pas l'eau salée en raison de son pouvoir de corrosion.

Corrosion : altération d'un matériau par réaction chimique.

Tableau 1 **Répartition des volumes et des pourcentages d'eau sur la Terre.**

Stocks totaux en eau	1,4 milliards de km³	
Océans, mers	1,35 milliard de km³	97,3 %
Glaces	27,5 millions de km³	2,15 %
Eaux souterraines	8,2 millions de km³	0,63 %
Lacs, rivières	207 000 km³	0,01 %
Humidité du sol	70 000 km³	0,005 %
Eau contenue dans les cellules vivantes	1 100 km³	0,0001 %
Humidité de l'air	13 000 km³	0,001 %

Il est donc capital de pouvoir récupérer l'eau usée, savoir la traiter et par la suite la réinjecter dans le circuit ; en d'autres termes, savoir recycler l'eau. Mais comme le montre la *figure 1* et ainsi que nous le verrons par la suite, la récupération et la purification de l'eau demande aussi de l'énergie…

Figure 3

Répartition des volumes et des pourcentages d'eau sur la Terre.

Extraction et raffinage du gaz

Nous distinguons l'exploration et la production du pétrole et du gaz en amont, le raffinage et la pétrochimie en aval. Chaque étape a des besoins spécifiques et importants en termes d'eau, du traitement des eaux usées comme du recyclage.

En amont, l'eau est injectée au fond du puits pour aider à la récupération du pétrole brut et du gaz. En général pour un baril de pétrole extrait, on utilise trois à dix barils d'eau (celle utilisée en amont et celle déjà présente dans le puits).

Figure 4

L'extraction du pétrole demande beaucoup d'eau…

Mais avant de réutiliser l'eau faut-il encore que nous puissions la purifier aux normes et exigences réglementaires avant de la réinjecter dans le puits pour un nouveau cycle de vie. Cette étape de purification demande encore de l'énergie (*Fig. 1*).

Le raffinage quant à lui requière des réacteurs thermiques fondés sur le même principe que les moteurs de voitures, des avions, des bateaux… lesquels pour se refroidir demandent comme nous l'avons vu ci-dessus de l'énergie.

Un réacteur thermique est un dispositif utilisé pour produire de l'énergie.

Le réacteur nucléaire

Fission : du latin *fissus* = fendu.

La fission des atomes d'uranium produit de la chaleur, chaleur qui transforme alors l'eau en vapeur (*Fig. 5*) et met en mouvement une turbine reliée à un alternateur qui produit de l'électricité (voir chapitre « De la force musculaire aux énergies renouvelables »).

Pour refroidir l'ensemble, de l'eau est encore nécessaire. Les réacteurs nucléaires sont très gourmands en eau : à savoir en 2005, pour produire l'équivalent en énergie, il aurait fallu dans le cas du nucléaire, environ 33 milliards de m^3 d'eau au lieu et place de 16,9 milliards de m^3 demandés par le thermique (*Tab. 2*).

Tableau 2 **Consommation en eau des diverses filières de production d'électricité.**

Production d'électricité (TWh)	2005	2020	2035
Thermique	12 126	18 641	24 782
– Charbon	7 235	9 679	12 601
– Gaz	3 478	6 746	8 908
– Pétrole	1 102	995	983
– Biomasse et déchets	311	1 041	2 290
Nucléaire	2 792	3 406	5 423
Hydro et géothermie	3 057	4 130	4 956
Éolien et solaire	94	1 129	3 910
Consommation en eau (Mds m^3)			
Thermique	16,9	24,3	32,5
– Charbon	12,8	17,1	22,3
– Gaz	2,5	4,9	6,5
– Pétrole	1,3	1,1	1,1
– Biomasse et déchets	0,4	1,2	2,6
Nucléaire	7,6	9,3	14,8
Hydro et géothermie	16,5	22,3	26,8
Éolien et solaire	0,0	0,5	1,9

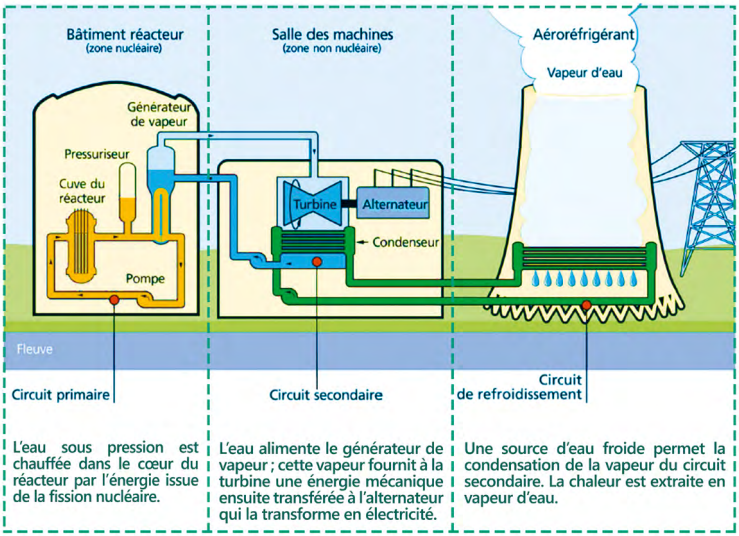


Figure 5

Rôle de l'eau dans le réacteur nucléaire : représentation simplifiée d'une centrale nucléaire avec ses trois circuits d'eau.

Production des combustibles par biomasse

La biomasse est considérée comme une source d'énergie (voir chapitre « La biomasse ») et les combustibles que l'on peut produire peuvent être le méthane, l'hydrogène ou l'éthanol.

Prenons un exemple en relation avec la production de l'éthanol dite bioéthanol et les exigences en eau.

Pour la fabrication du bioéthanol, nous distinguons dans le procédé plusieurs étapes :

- le broyage ;
- la liquéfaction ;
- la fermentation ;
- le séchage.

Avant tout, il faut noter que l'étape la plus consommatrice en eau est celle de la culture des céréales avec une consommation pouvant aller de dix litres (exemple de l'Illinois, États-Unis) à 324 litres (exemple du Kansas, États-Unis) pour la production de seulement un litre de bioéthanol !

Remarque

Le climat et la pluviométrie sont donc déterminants quant à la consommation d'eau en relation avec la production de biocarburants.

Heureusement, de nouvelles sources de bioéthanol et de nouveaux procédés en partant des résidus, dérivés du bois des forêts (bioéthanol cellulosique) exigeraient beaucoup moins d'eau : à savoir dix litres d'eau pour un litre de bioéthanol. Ceci devrait être confirmé à grande échelle.

Remarque

Un giga = un milliard
Un joule = 4,2 cal, soit 1 000 joules = 4,2 Kcal.
1 m^3 d'eau = une tonne d'eau.

En ce qui concerne les étapes de broyage, liquéfaction, fermentation et séchage, des progrès considérables ont été apportés. Par exemple, l'amélioration des procédés en relation avec l'élimination de la vapeur durant l'étape de séchage, ou les techniques de recyclage de l'eau qui ont contribué à environ 50 % d'économie d'eau, ceci bien évidement après dix ans de Recherche et Développement !

La consommation en électricité tout au long du cycle de l'eau

Remarque

Au Royaume-Uni, on estime que l'énergie de pompage de l'eau à potabiliser représente 60 % de l'ensemble de l'électricité consommé sur le cycle de l'eau.

Le cycle de l'eau comprend plusieurs étapes à savoir pour l'essentiel : le pompage, l'épuration, la potabilisation et la distribution.

Le pompage

Le pompage de l'eau souterraine nécessite en règle générale plus d'énergie que le prélèvement de l'eau de surface. En revanche, suivant la localisation du site de captage, il est parfois nécessaire d'acheminer l'eau prélevée sur de très grandes distances.

La potabilisation

La potabilisation de l'eau est fortement dépendante de son origine et des procédés utilisés. La *figure 6* reprend les consommations énergétiques associées à l'origine de la source d'eau.

Alimentation en eau brute	Énergie nécessaire pour l'alimentation et le traitement (kWh/m³)
Eau de surface	0,5 - 4
Eau recyclée	1 - 6
Dessalement	4 - 8
Eau en bouteille	1 000 – 4 000

Figure 6

Consommation énergétique en fonction de la source et du mode de distribution de l'eau à traiter.

Au cours des dernières années, on a pu remarquer un intérêt constant des producteurs d'eau pour l'utilisation de sources d'énergies renouvelables telles que l'éolien (le vent) ; l'hydraulique de faible différence de hauteur ou encore le photovoltaïque (le Soleil).

De plus, la recherche des technologies moins voraces en électricité telles que les UV ou les LED sont en plein développement.

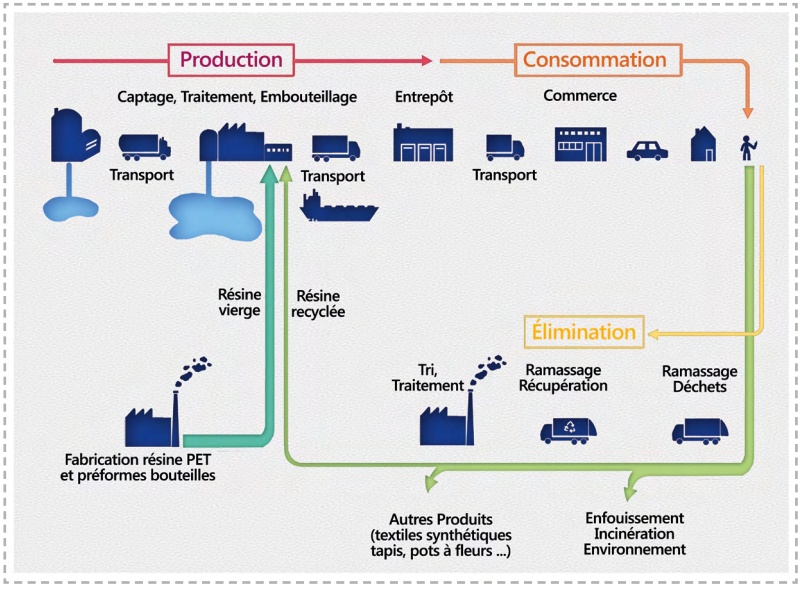


Figure 7

Cycle de vie de l'eau en bouteille.

Remarque

La distribution requiert en général peu d'énergie ; on estime la consommation à environ 0,1 KWh/m³.

Remarque

L'énergie nécessaire à l'épuration des effluents liquides dépend de la nature et de la concentration des polluants présents.

Le traitement des eaux usées

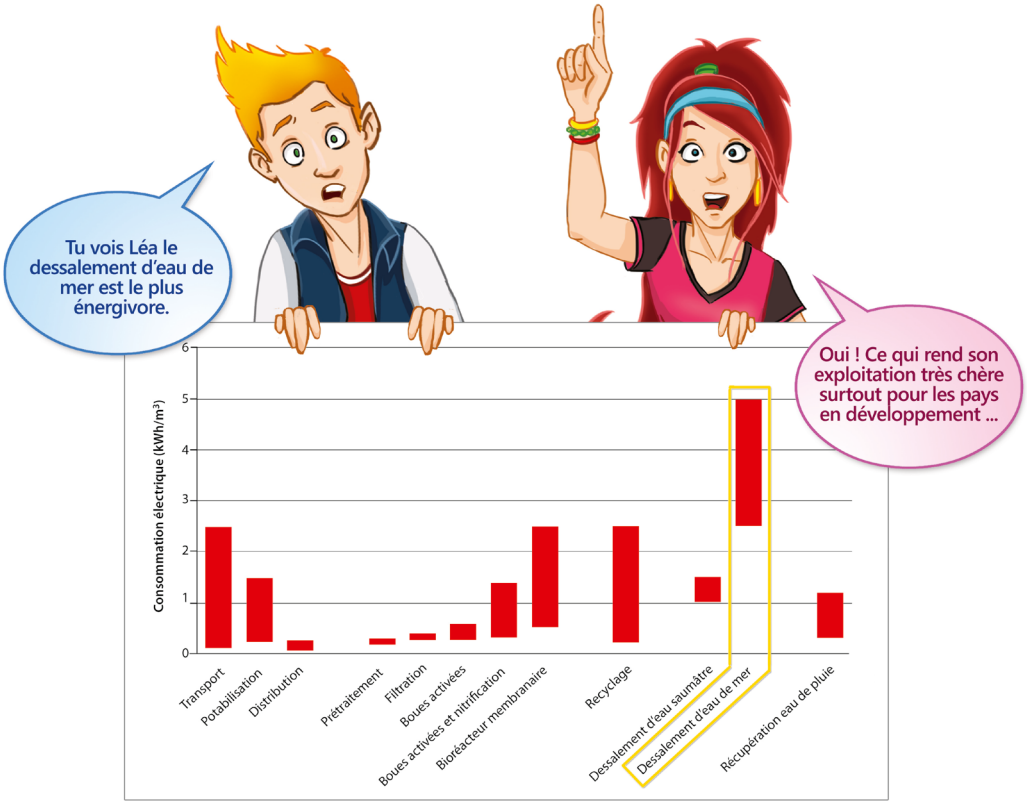
L'énergie nécessaire au traitement des eaux usées correspond à la somme de ce qui est exigé pour acheminer l'eau jusqu'à la station d'épuration et son épuration proprement dite.

L'étape d'aération au cours du traitement primaire est prédominante, elle est de l'ordre de 0,2 KWh/m³. L'élimination poussée du carbone, de l'azote et du phosphore est également très énergivore et représente environ 0,9 KWh/m³.

La *figure 8* synthétise l'ensemble de diverses consommations énergétiques tout au long du cycle de l'eau.

Figure 8

Besoins en électricité dans le cycle de l'eau.



Au cours des dernières années, le concept de station d'épuration en énergie positive s'est fortement développé. Ainsi, les stations d'épuration deviennent des plates-formes environnementales qui peuvent produire une partie de l'énergie nécessaire aux éco-cités de demain ; l'empreinte écologique est ainsi réduite.

L'énergie provient du biogaz produit par exemple lors de la digestion des boues ; en cas de pic de demande d'énergie, l'électricité est fournie par le réseau. À l'inverse, en cas de surproduction, l'excès de l'électricité est réinjecter dans le réseau.

Énergie positive : ce dit d'un principe qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme.

Remarque

En Australie, le surplus de l'énergie produit par une station d'épuration représente environ 7% de ses besoins propres.

Conclusion

La prise de conscience à la fois collective et politique est maintenant là… l'avenir se dessine et il est primordial de progresser vers le développement des points suivants :

– économiser l'eau : toute réduction de consommation en eau (ou plutôt toute utilisation rationnelle et réfléchie de l'eau) se traduit immédiatement par une réduction de besoins énergétiques ;

– augmenter la performance et l'efficacité dans chacune des nombreuses opérations liées au cycle de l'eau (savoir utiliser de plus en plus des sources d'eau usée par exemple pour les circuits de refroidissement tout en évitant les effets de corrosion) ;

– employer les ressources présentes dans l'eau impure pour en produire de l'énergie en utilisant par exemple les nutriments pour produire du biogaz. Pour ce faire, il faudra améliorer les stations d'épuration et investir dans les municipalités car il s'agit là d'un problème qui se traite localement (site, impuretés, climat…) ;

– développer des technologies percutantes en particulier pour le dessalement de l'eau de mer. Par exemple, en mettant au point des membranes d'ultrafiltration et d'osmose inverse moins énergivores.

L'ensemble de ces efforts demande des investissements à la hauteur de l'enjeu pour la Recherche et le Développement et une meilleure coordination entre les différentes instances régionales et locales.

2 PARTIE

COMMENT SE PASSER DES ÉNERGIES FOSSILES

LA BIOMASSE : UN RÉSERVOIR D'ÉNERGIE POUR DEMAIN

Remarque

On s'éclairait déjà il y a 12 000 ans, avec de la graisse, ce qui est encore vrai pour des populations isolées vivant prêt du pôle Nord.

Remarque

Le premier moteur diesel dans les années 1900 fonctionnait à partir d'huiles végétales plutôt que de carburants fossiles (pétrole, gaz, charbon).

Avant même l'arrivée du pétrole, le premier biocarburant était l'avoine !

Cinq millions d'hectares étaient utilisés pour produire l'avoine qui servait de nourriture aux chevaux afin de véhiculer des populations, les marchandises…

C'était une forme de biocarburant mais le réacteur qui traduisait l'avoine en énergie était le cheval qui savait très bien la biotransformer.

Les sciences ont progressé et l'homme est aujourd'hui capable, tels les chevaux, d'effectuer des chimio- ou biotransformations à partir de ce que nous appelons la biomasse.

Nous allons tout le long de ce chapitre parcourir les évolutions réalisées dans ce domaine et ainsi prendre conscience de comment l'homme a pu développer des sources énergétiques nouvelles et prometteuses pour l'avenir.

Figure 1

Avant l'arrivée du pétrole.

Qu'est-ce que la biomasse ?

Le terme regroupe l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale pouvant devenir des sources d'énergie.

Les matières organiques qui proviennent des plantes peuvent être considérées comme une forme de stockage de l'énergie solaire, captée et utilisée par les plantes grâce à une substance chimique dite chlorophylle et bien sûr le dioxyde de carbone ambiant.

Nous considérerons comme biomasse la partie biodégradable des :
– produits déchets et résidus provenant de l'agriculture y compris les déchets organiques de l'industrie alimentaire ;
– produits et déchets provenant de la sylviculture (« sylva » en latin = bois, forêt) ;
– déchets et résidus végétaux de l'industrie du bois (exploration forestière…).

Les biocarburants

En préambule, il faut noter que dans le monde en développement, les besoins énergétiques en mobilité dépassent substantiellement les besoins en électricité (*Fig. 2*).

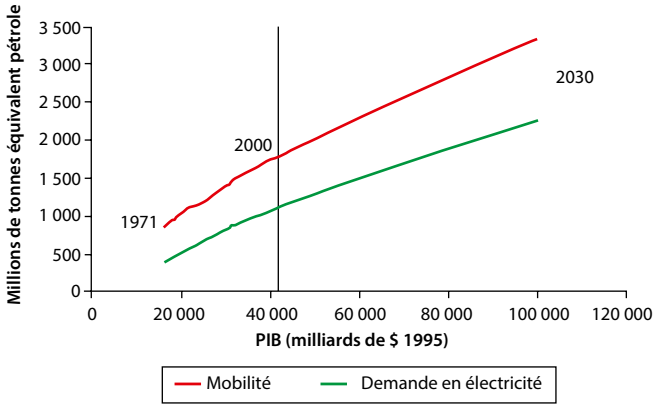


Figure 2

Une demande en croissance pour la mobilité.

Si l'on tient compte des enjeux du futur, les objectifs sont :

- réduire la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles (charbon et pétrole pour l'essentiel) en diversifiant les sources d'énergie ;
- contrôler le réchauffement climatique et entre autres, diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

Les biocarburants, c'est-à-dire les carburants issus de matières végétales sont une alternative aux énergies fossiles dans le secteur des transports.

Figure 3

La biomasse, une solution d'avenir.

La diversité des biocarburants

Différents types de biocarburants

On trouve les biocarburants liquides comme gazeux :

- liquides :
  – éthanol/ETBE (éthyle t-butyle éther),
  – huile végétale pure,
  – biodiesel : esters des acides gras,
  – huile végétale hydrogénée,
  – autres produits (bio-butanol…) ;
- gazeux :
  – biogaz,
  – DME (diméthyle éther),
  – hydrogène.

Les biocarburants sont classés en deux voire trois générations.

Génération 1

Elle est issue des plantes qui ont un contenu énergétique et sont facilement accessibles, puisque c'est en partie celles que nous utilisons pour nous nourrir.

Il y a là indiscutablement une concurrence entre production alimentaire et production de carburants : faut-il cultiver les terres agricoles pour produire des ressources alimentaires ou pour fabriquer de l'énergie ?

Remarque

Il s'agit de la betterave, de la canne à sucre, du blé, du maïs, de la pomme de terre, du colza, du tournesol…

Génération 2

Cette génération est intéressante dans la mesure où elle se développe à partir des déchets, ceux du type lignocellulosique.

Remarque

Il s'agit du bois, de l'herbe, des résidus agricoles et forestiers.

Génération 3

Les procédés s'appuient de plus en plus sur l'utilisation de microorganismes tels que les microalgues. Ce type de procédés doit se développer et s'industrialiser dans un futur proche

Figure 4

Une nouvelle génération de biocarburant grâce aux microalgues.

Les cyanobactéries et les microalgues sont toutes deux des microorganismes photosynthétiques bien que différents dans leur constitution ; les uns étant dans l'ordre des procaryotes, les autres des eucaryotes.

Photosynthèse : processus biochimique qui permet aux plantes, grâce à l'énergie solaire et une substance chimique dite chlorophylle, de transformer le carbone inorganique (dioxyde de carbone) en matière organique, par exemple le sucre.

Procaryote : micro-organisme généralement unicellulaire dont la cellule, très petite, est dépourvue d'organites et de noyau. Le matériel génétique se trouve dans le cytoplasme de la cellule par exemple les bactéries.

Le procédé est assez simple : il s'agit de fournir aux microalgues, au sein d'un bassin, les nutriments nécessaires et du dioxyde de carbone qui grâce au rayonnement solaire, produiront la biomasse exigée (*Fig. 5*).

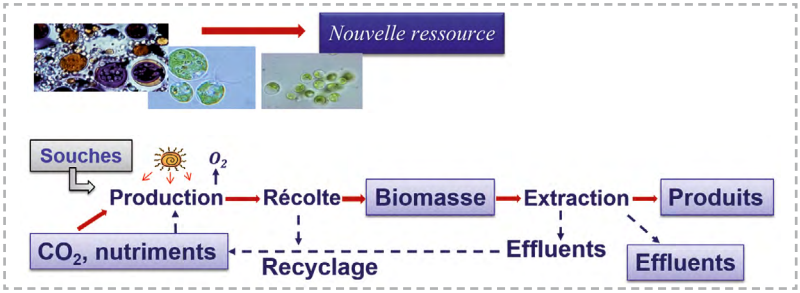


Figure 5

Le cycle de production des microalgues.

Eucaryote : organisme plus compliqué dont le matériel génétique est contenu dans un noyau et permet une plus large diversification génétique (Homme, animaux, plantes…)

La photosynthèse, seule partie visible du spectre, permet l'utilisation du carbone minérale donc du CO_2 pour le métabolisme de l'organisme.

De la même façon que les autres plantes, les nutriments se résument à du phosphore, nitrates, etc.

Remarque

La production d'algocarburants permettrait également de recycler le CO_2 émis par des usines ou des centrales thermiques.

La valorisation énergétique des microalgues

L'hydrogène

Les premières études, déjà anciennes, se sont intéressées à l'hydrogène puisqu'il a été observé, depuis les années 1940, que sous certaines conditions, les algues étaient capables de produire de l'hydrogène.

Et ceci constitue une des cibles privilégiées des industriels pour la production future.

Remarque

La production se fait à partir d'une microalgue appelée *chlamydomonas reinhardtii*.
Elle possède une enzyme (catalyseur biologique), dite hydrogénase et est capable de transformer les protons en hydrogène, H^+ en H_2.

Les hydrocarbures

Beaucoup de laboratoires se sont orientés vers la production des lipides, de carburants diesel ou d'autres hydrocarbures puisque certaines microalgues les produisent et les relèguent dans le milieu.

La *figure 6* montre un exemple de production de substances lipidiques à fort potentiel énergétique.

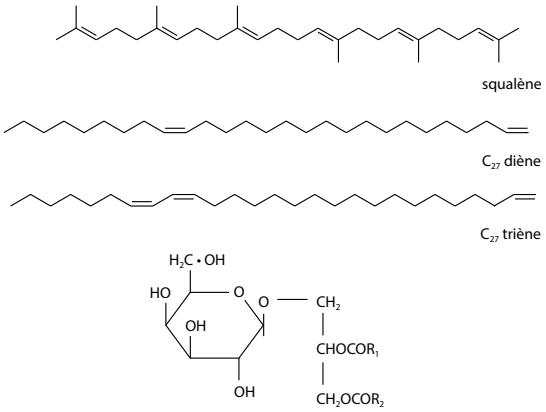


Figure 6

Les lipides neutres, comme les triacylglycérols, sont une des classes de molécules produites par les microalgues, lieu de stockage d'énergie.

Remarque

Les polysaccharides sont une source de bioéthanol.

Autres biomatériaux

Des mélanges avec d'autres déchets sont possibles pour la phase de production et extraction.

Là aussi, il y aura de la concurrence avec les ressources en nutrition mais il faut souligner le potentiel de haut rendement de production des « biomatériaux » (protéines, glucides, lipides…) quand les différentes étapes d'élaboration seront optimisées.

Spiruline : algue comestible, de la famille des cyanobactéries, utilisée comme complément alimentaire.

Un exemple parlant : la spiruline

Une poignée de spiruline peut contenir l'équivalent d'environ :
– 35 g de bœuf en protéines ;
– trois verres de lait en calcium ;
– trois bols d'épinard en fer.

À noter que la qualité des protéines de la spiruline est celle exigée pour l'alimentation humaine.

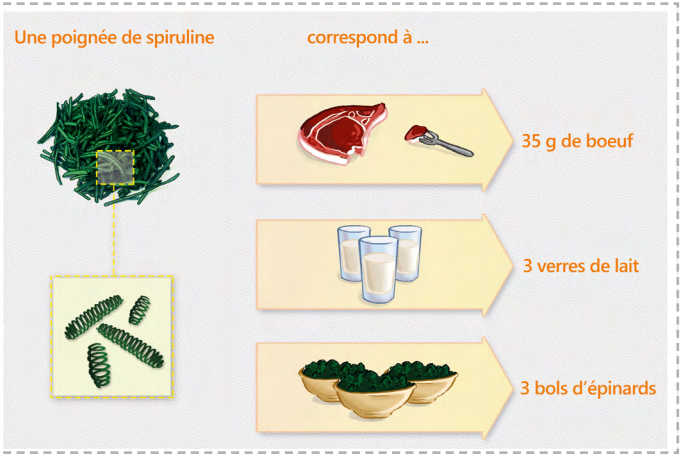


Figure 7

Exemple de la spiruline (compétition ressources nutritionnelles).

La biomasse : un projet d'avenir pour la chimie

La règle d'or consiste à vérifier que l'énergie consommée est inférieure ou au moins égale à celle produite par le nouveau procédé.

Une des stratégies consiste à scinder les molécules issues de la nature en monoxyde de carbone et hydrogène et les recombiner pour former des hydrocarbures par une réaction de synthèse dite de « Fischer-Tropsch ».

Synthèse de « Fischer-Tropsch »

L'invention du procédé remonte à 1923.
Il repose sur la transformation catalytique de l'oxyde de carbone par l'hydrogène en hydrocarbures, servant de carburant liquide synthétique.
Ce procédé a été mis au point et exploité lors de la Seconde Guerre mondiale par l'Allemagne, pauvre en pétrole mais riche en charbon.

La *figure 8* ce que nous pouvons faire par cette reconstitution et les utilisations possibles.

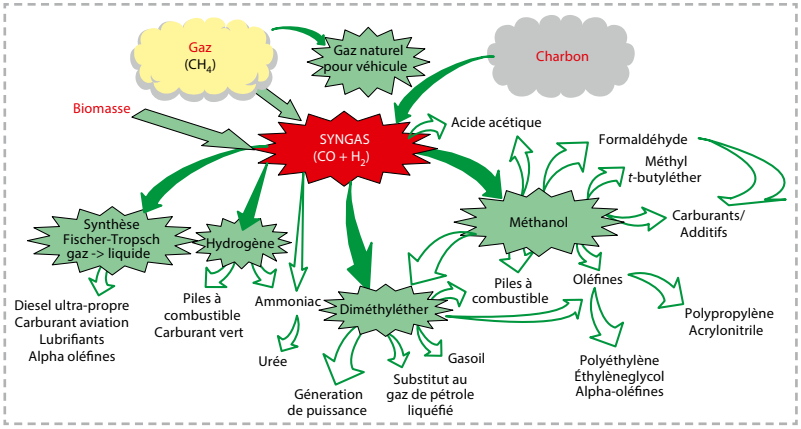


Figure 8

Chimie et filières alternatives en vue de diminuer les rejets de gaz à effet de serre.

Cette voie de synthèse n'est pas optimale dans la mesure où il s'agit d'une voie thermochimique donc par définition énergivore.

Pour y remédier, il s'agit donc de développer et accélérer deux axes de recherche et de développement bien distincts qui demanderont coopération et synergie des savoir-faire de disciplines voisines :

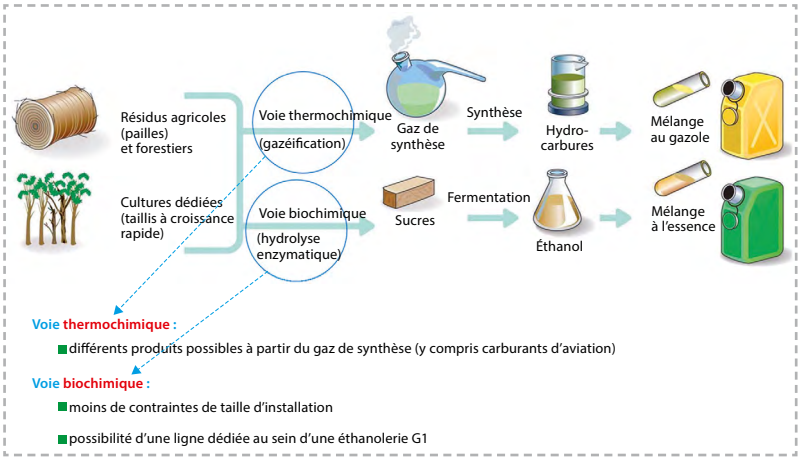
- la découverte et mise au point (procédés de synthèse) de nouveaux catalyseurs susceptibles d'abaisser l'effort énergétique exigé ;
- la voie biochimique basse température utilise des enzymes pour catalyser la transformation de la biomasse en sucre, qui par fermentation, conduit à l'éthanol dit de deuxième génération (*Fig. 9*).

Catalyseur : substance qui favorise une réaction chimique au moindre coût énergétique ; il s'agit simplement d'un levier qui nous permet de soulever des poids insoulevables autrement.

Enzyme : substance organique qui active une réaction biochimique.

Figure 9

Les filières biocarburants de 2e génération.



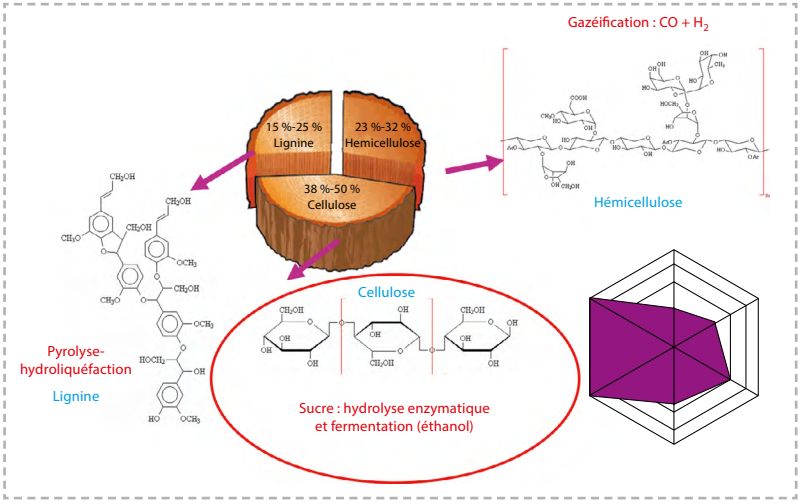
Pyrolyse : défaire des liaisons chimiques par le feu (pyra en grecque = feu).

Cette dernière méthode pose moins de contraintes de tailles d'installations.

Il faut séparer la lignine de la cellulose comme de l'hémicellulose ; le procédé actuellement utilisé demande une réaction chimique exigeant une très haute température dite pyrolyse (*Fig. 10*).

Figure 10

Éthanol de seconde génération.

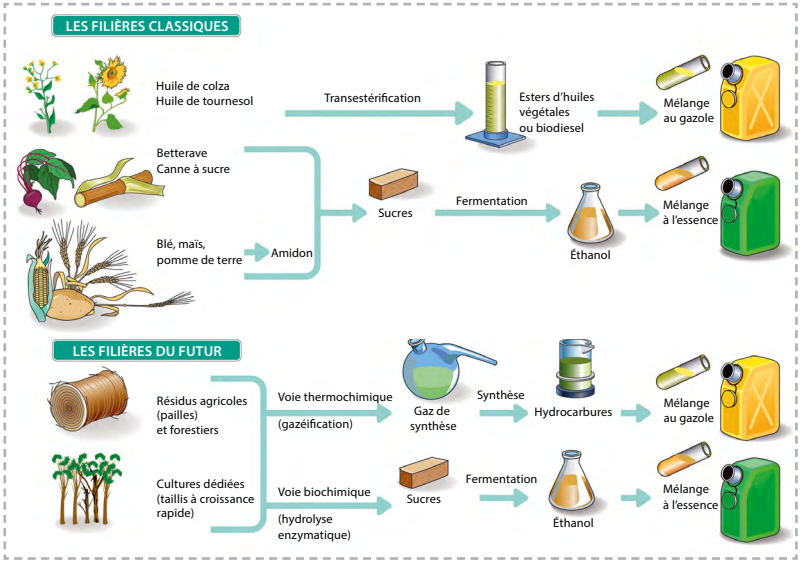


La cellulose est par la suite hydrolysée en glucose par l'intermédiaire d'une réaction de catalyse enzymatique.

Le glucose est transformé en méthanol par fermentation puis récupéré par distillation.

Comme le montre la *figure 11*, pour ce qui concerne l'hémicellulose qui représente en gros 30 % du bois, elle peut aussi être valorisée et transformée en gaz de synthèse.

En termes de conclusion, si l'on compare les différentes voies de production de biocarburants, les procédés biochimiques apparaissent plus intéressants car moins consommateurs en énergie. La *figure 11* résume l'ensemble des démarches poursuivies.



Les biocarburants **de première génération**, utilisant le sucre, les céréales et les huiles végétales ont permis, grâce aux filières classiques, de fabriquer de l'éthanol et du biogaz utilisés dans les moteurs essence, ainsi que du biodiesel à partir d'huiles végétales hydrogénées, utilisé dans les moteurs diesel.

En revanche, ces carburants sont peu utilisables dans l'aviation, un mode de mobilité qui augmente de plus en plus.

Les biocarburants **de deuxième génération** utilisant le bois et les déchets sont ceux dont les filières de production seront développées dans le futur pour produire :

- de l'éthanol, du bio-butanol, du biogaz et de l'hydrogène, utilisables dans les moteurs à essence ;

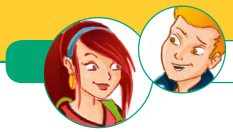
Remarque

La cellulose est un polymère de glucose qui lie chaque unité en une chaîne qu'il faut défaire pour récupérer l'unité (anneau) élémentaire.

Figure 11

Les principales voies pour la production de biocarburants.

Distillation : procédé qui consiste grâce au point d'ébullition d'un liquide de le séparer par chauffage des autres liquides qui l'accompagnent dans un mélange parfois complexe ; ainsi le méthanol qui « bout » avant l'éthanol où l'eau est le premier à être évaporé et récupéré par refroidissement sous forme de liquide propre.



- du biodiesel à partir de la biomasse transformée en liquide et du diméthyle éther utilisable dans les moteurs diesel ;
- de l'hydrogène et des alcools lourds utilisables dans l'aviation.

En ce qui concerne **la troisième génération** en relation avec les microalgues,

le nombre gigantesque et l'extrême diversité des microalgues offrent un éventail impressionnant pour effectuer des synthèses chimiques ou des biotransformations de produits d'intérêt pour l'ensemble de l'humanité. Ils ont l'avantage d'utiliser, pour grandir et produire, simplement de l'énergie solaire, laquelle est transformée en produits, grâce à la photosynthèse et le gaz carbonique.

Des progrès significatifs ont été réalisés. La conjugaison et coopération future de savoir-faire du génie génétique comme chimique devrait très rapidement permettre l'exploitation de cette immense réserve d'énergie.

Conclusion

La biomasse offre aujourd'hui de belles perspectives comme source d'énergie. Les chimistes doivent continuer à travailler pour développer des techniques afin d'optimiser leur utilisation.

LE TRANSPORT OU LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Si on produit **trop d'électricité à un même instant**, on ne peut pas la consommer par utilisation immédiate. Pourtant, cela arrive très souvent, par exemple quand il y a beaucoup de vent et que toutes les éoliennes fonctionnent ou dans les lieux très ensoleillés avec les installations solaires.

Que faire quand on n'utilise pas tout de suite l'électricité produite ?

On ne veut pourtant pas perdre cette électricité et on va donc vouloir la « stocker» comme on stocke du sucre pour pouvoir l'utiliser en cas de pénurie. On prend le produit disponible, on le met en réserve quelque part – sur une étagère, dans une grange – puis on le ressort pour l'utiliser quand on en a besoin.

Mais l'électricité ? ce n'est pas une marchandise que l'on peut saisir de ses mains pour la reléguer quelque part et la retrouver plus tard. On ne va pas alors « stocker l'électricité » (ce qui ne veut rien dire au sens propre) mais plutôt utiliser le trop de production pour préparer une installation qui pourra produire de l'électricité plus tard – par exemple quand les éoliennes ne fonctionneront plus faute de vent ou la nuit puisque les installations solaires ne tournent plus.

Dans d'autres cas, **on veut une source d'électricité mobile** (par exemple pour faire rouler les voitures). On doit là aussi préparer une installation qui pourra permettre d'utiliser l'électricité après sa production.

Trois exemples de systèmes de stockage

Nous allons décrire trois exemples de systèmes qui marchent et qui auront de plus en plus d'importance au fur et à mesurer que les nouvelles sources d'électricité (le vent, le Soleil) se développeront.

Remarque

Un système de stockage doit être facilement utilisable. C'est facile s'il s'agit de stocker du sucre mais pas évident pour l'électricité puis que ce n'est pas un « objet » - il faut donc prévoir dès le départ comment re-créer de l'électricité à partir de l'installation de stockage.

Stockage STEP (solution de transfert d'énergie par pompage)

L'électricité produite est utilisée pour faire fonctionner une pompe. Celle-ci sert à monter l'eau située dans un grand réservoir (un lac par exemple) vers un réservoir aussi grand situé à une altitude plus élevée. Pour réutiliser l'eau située dans le lac d'altitude élevée, on ouvre les vannes qui conduisent au lac inférieur : la chute d'eau fait tourner une turbine qui produit l'électricité dont on a besoin (voir chapitre sur « Le challenge de l'électricité verte »).

Stockage par production d'hydrogène

L'électricité produite en excès peut être utilisée pour produire du gaz hydrogène à partir d'eau. Ceci se fait au moyen d'un électrolyseur qui décompose l'eau en hydrogène plus oxygène. L'hydrogène (qui lui est un objet) est stocké dans des réservoirs ou dans les conteneurs qui en permettent le transport. Pour l'utiliser, on peut l'introduire comme combustible dans des bruleurs (comme on fait du gaz de ville) – c'est une solution déjà pratiquée aussi bien pour le gaz d'éclairage que pour certaines voitures ; on peut aussi l'utiliser pour alimenter des « piles à combustible » qui produisent du courant électrique à partir d'hydrogène et d'oxygène gazeux (voir plus loin).

Les piles et les batteries électriques

Les batteries sont des dispositifs (des instruments portables) qui utilisent la propriété des ions (qui sont des atomes chargés électriquement parce qu'ils présentent soit un excès soit un défaut d'électrons), de changer leur charge au cours de certaines réactions chimiques.

Dans l'état chargé, les ions positifs (charges positives par défaut d'électron) et les ions négatifs (charges négatives par excès d'électron) sont regroupés dans deux zones différentes du système ; dans l'état déchargé, ils sont également répartis (neutralité électrique). L'opération de stockage consiste à utiliser le courant pour placer la batterie dans son état chargé. L'utilisation du stockage consiste à utiliser la batterie chargée pour produire du courant jusqu'à la décharge de la batterie.

Comment marche une pile électrique ou une batterie ?

Une pile électrique, c'est une boîte (ou une cellule) qui comprend deux compartiments dans lesquels se déroulent des réactions chimiques et que l'on relie, à l'extérieur de la cellule par un fil conducteur (un fil métallique) du courant (*Fig. 1*).

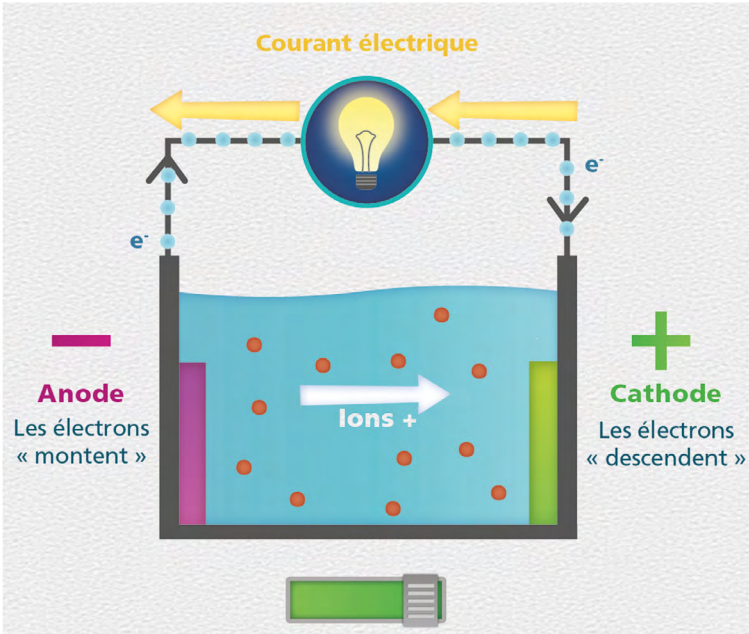
Qu'est-ce qu'un ion ?

Un atome A est constitué d'un noyau (charge électrique positive) et d'électrons (charges électriques négatives) attirés autour de lui.
Si un ou des électrons manquent ou s'il y en a en trop, on dit qu'on a affaire à un ion. S'il manque des électrons, on a un ion positif A^+. S'il y en a en trop, on a un ion négatif A^-. On note parfois l'atome A0 l'atome neutre.

Le lithium - Li ou Li0, Li^+ (ion lithium).

Figure 1

Schéma de principe d'une pile électrique.



Dans le premier compartiment se déroule la réaction « Ion Réducteur donne Ion Oxydant + électron » qui libère un électron dans le milieu réactif. On va s'arranger pour que cet électron soit accueilli par un fil conducteur du courant électrique. Ceci se fait par l'intermédiaire d'une électrode – dans ce cas une électrode négative qu'on appelle **anode**.

Dans l'autre compartiment, la réaction chimique, au contraire, « consomme » un électron au lieu d'en libérer un. Elle se résume par « Ion Oxydant + électron donne Ion Réducteur ». L'électron – c'est l'inverse du premier compartiment - provient d'un fil conducteur du courant. Ceci se fait par l'intermédiaire d'une électrode positive qu'on appelle la **cathode**.

Les deux électrodes sont reliées par un fil conducteur du courant qui passe à l'extérieur de la boîte. L'électron, fourni à l'anode dans le premier compartiment, circule jusqu'au deuxième compartiment pour regagner la cellule et entrer en réaction chimique par la cathode. Il s'agit donc bien du passage d'un courant électrique provoqué par les deux réactions chimiques qui se passent dans la cellule.

Les réactions chimiques internes à la cellule, alimentent ainsi le circuit extérieur en électricité pour l'appareil de consommation du courant, résumé ici par une ampoule électrique – qu'on peut allumer grâce à la pile. Selon ce principe de nombreux type de dispositifs ont été construits, des piles, des batteries, des petites, des grosses, etc. selon l'usage prévu. La *figure 2* en est un exemple.

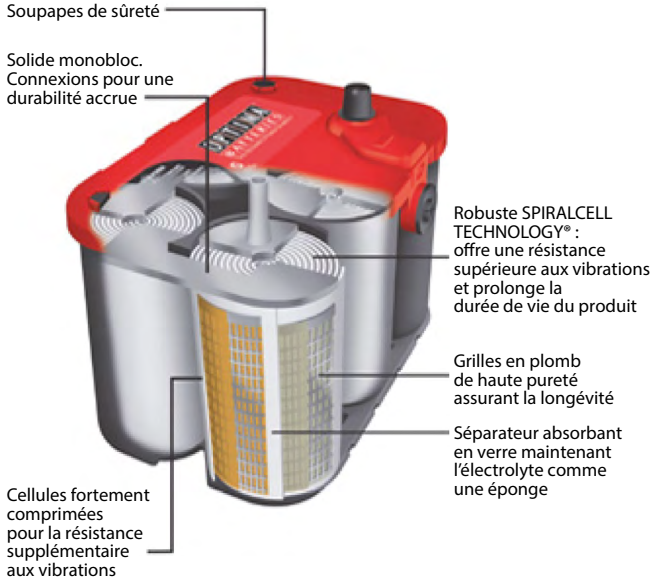


Figure 2

Schéma d'une batterie constituée de l'empilement de cellules élémentaires.

Remarque

On parle plutôt de pile lorsque le dispositif n'est pas rechargeable (jeter après usage) et de batterie lorsqu'on le recharge pour continuer à l'utiliser. L'usage courant cependant n'est pas rigoureux (on parle aussi commercialement de « pile rechargeable »).

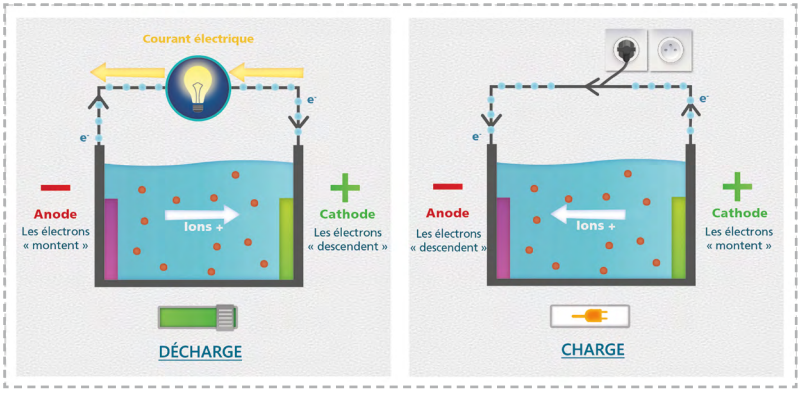
Le fonctionnement en charge et décharge d'une batterie

Au cours du fonctionnement de la pile, les électrodes s'usent. Au bout d'un certain temps, elles ne peuvent plus fournir d'électricité, la pile est vide ! Une solution simple : on jette la pile et on en rachète une neuve. C'est pratique mais ça coûte de l'argent.

Il existe d'autres solutions car certaines piles peuvent être rechargées (on les appelle alors plutôt des « batteries »). *La figure 3* montre le principe.

Figure 3

Principe de charge et décharge d'une batterie.



Dans le circuit précédent, on remplace l'ampoule par un générateur de courant (par exemple, on le branche au secteur EDF). Les réactions chimiques des deux compartiments se passent alors exactement à l'inverse. Au lieu de transférer un électron de l'anode vers le circuit, on le transfère du circuit vers l'anode et symétriquement dans l'autre compartiment au lieu de transférer un électron du circuit vers la cathode, on le transfère de la cathode vers le circuit. Les mécanismes chimiques, qui avaient usé les électrodes dans la décharge, se font en sens inverse et les reconstituent (au moins partiellement) au cours de la charge. La batterie est prête à re-fonctionner.

Une batterie, c'est de la chimie ! L'exemple des batteries lithium-ion

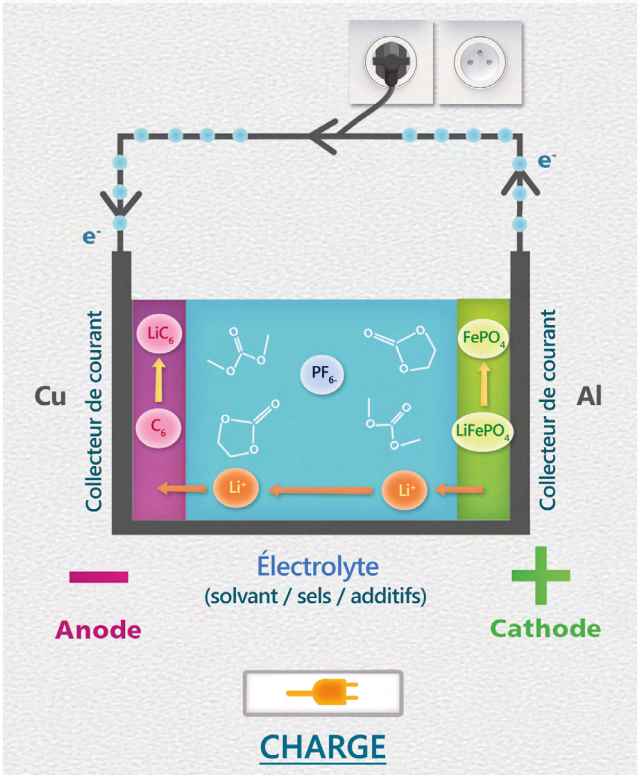


Figure 4

Schéma de la batterie lithium-ion. Réaliser une batterie selon le schéma de la figure 1 demande beaucoup de chimie : il faut définir et réaliser les matériaux des électrodes, définir la composition exacte de la solution ionique. C'est grâce à ces choix qu'on pourra obtenir de bonnes performances et des durées de vie satisfaisantes.

Le fonctionnement d'une batterie fait qu'un électron, libéré par la réaction chimique de l'anode, est accueilli par l'électrode (l'anode) pour être envoyé ensuite dans le fil conducteur. L'électron fourni à la cathode par le courant électrique est par la suite utilisé par la réaction chimique dans le compartiment cathodique (*Fig. 4*).

Remarque

Malgré les progrès considérables accomplis, le travail se poursuit : **pour faire marcher les voitures on doit être extrêmement exigeant (durée de vie des batteries, poids, volume et bien sûr puissance suffisante)** et le tout pour un prix raisonnable.

Ces propriétés imposent que **les matériaux choisis pour les électrodes soient les bons**. C'est un des verrous principaux dans la réalisation d'une batterie. Ils doivent avoir la bonne nature chimique de leurs atomes et la bonne structure atomique pour être retenus.
Pour la cathode d'une batterie lithium-plomb, on a développé un assemblage d'atomes de phosphore et d'oxygène (groupement phosphate), lié à des atomes de fer et des atomes de lithium en nombre égal. Ce phosphate de fer et de lithium, $LiFePO_4$, peut voir sa composition en lithium varier du fait de la réaction chimique et c'est ce qui permet son fonctionnement en électrode.
Pour réaliser l'anode, on utilise préférentiellement du graphite, une forme du carbone constituée de couches empilées comme les feuilles d'un livre, et qui peut accueillir des atomes de lithium entre ses feuillets.
À chaque stade des réactions chimiques qui prennent place dans la batterie, **les électrodes sont soumises à des contraintes extrêmement fortes** : échauffements locaux qui conduisent à des déformations, migrations des atomes qui entraînent des baisses de performances etc. C'est pourquoi la mise au point des électrodes est la difficulté principale de la réalisation des batteries. On a déjà de bonnes solutions, mais on explore de nouveaux systèmes qui pourraient être meilleurs.

Stockage par production d'hydrogène

Principe de la pile à hydrogène (pile à combustible)

Comme toutes les piles (*voir encart ci-dessus*), la pile à combustible comporte deux compartiments (*Fig. 5*).

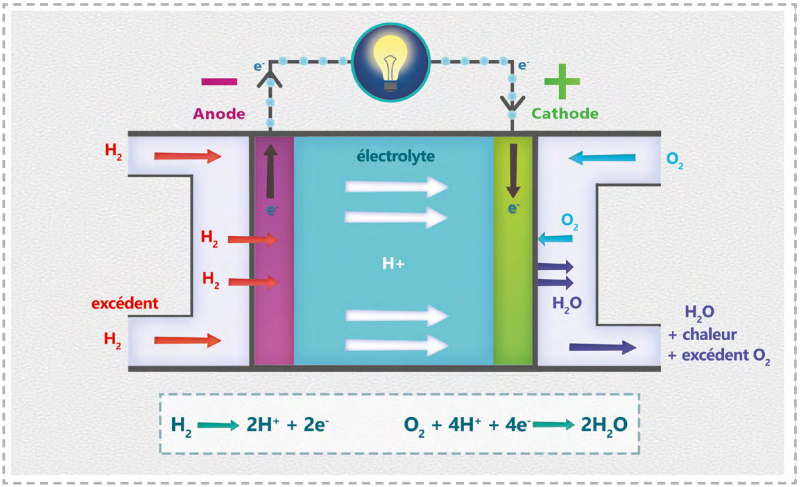


Figure 5

Schéma de principe d'une pile à combustible. Son alimentation en combustible (l'hydrogène et l'air) est particulièrement simple. Entre les compartiments anodique er cathodique, on place une membrane échangeuse d'ion dont la mise au point est difficile et encore en phase d'amélioration.

Le compartiment anodique est alimenté par un flux d'hydrogène gazeux et réalise la réaction $H_2 \rightarrow 2\ H^+ + 2$ électrons.

L'électron est fourni au conducteur extérieur.

Le compartiment cathodique est alimenté par un flux d'oxygène gazeux. Il s'y déroule la réaction $O_2 + 4$ électrons $\rightarrow 2$ ions oxygène négatifs O^{--}. Les électrons proviennent du conducteur extérieur.

Dans l'espace électrolytique qui sépare les deux électrodes à l'intérieur de la cellule, la combinaison se fait entre les ions H^+ et O^- et produit des molécules d'eau, selon la réaction $O^{--} + 2H^+ \rightarrow OH_2$. Dans les piles à combustible, on utilise souvent une membrane pour séparer les deux compartiments ; elle est constituée d'un polymère qui laisse passer les ions hydrogène et filtre les autres espèces.

La nature n'est pas toujours facile à manipuler ! Les trois réactions en cause, ionisation de l'hydrogène, de l'oxygène et recombinaison des ions en molécules d'eau ne se maîtrisent pas toutes seules. Par exemple l'hydrogène et l'oxygène mis en présence l'un de l'autre peuvent provoquer des accidents par explosion.

Remarque

Pour maîtriser les réactions chimiques entre tous ces produits, on doit mettre les réactifs en présence de platine, c'est le catalyseur. La réaction fonctionne très bien, mais le procédé souffre de son prix : le platine est le métal le plus cher qui soit. Les piles à combustibles ont un fonctionnement très simple : il suffit de les alimenter par un courant d'hydrogène à l'anode et d'oxygène à la cathode ; c'est ce qui leur donne leur nom

Production industrielle du gaz hydrogène

Le principe de la pile à combustible pour produire du courant est aussi celui de l'électrolyseur à eau qui fournit de l'hydrogène. C'est en quelque sorte les mêmes réactions chimiques mais dans le sens inverse.

Elles ont été utilisées pour des tâches où il était difficile d'intervenir : par exemple dans la mission spatiale APPOLLO qui a vu le premier homme sur la Lune en 1969 ou encore les missions des sous-marins. Dans ces situations, il était intéressant **non seulement de tirer le courant électrique des piles à combustible, mais également l'eau produite** – car au fond de la mer, on manque d'eau potable, comme sur la Lune...lithium).

On alimente les cellules en eau et l'électrolyseur relargue de l'hydrogène à la cathode et de l'oxygène à l'anode. C'est l'« électrolyseur à eau ou à hydrogène » *(Fig. 6)*. Les électrolyseurs peuvent être alimentés par la puissance électrique qui vient des énergies renouvelables – et le seront de plus en plus.

Des installations qui fonctionnent selon ce principe à l'échelle industrielle ont été construites à des capacités moyennes ; de plus importantes sont en construction. Elles alimentent des réserves d'hydrogène disponibles pour le transport vers les zones d'utilisation directe par combustion ou au moyen des piles à hydrogène décrites plus haut.

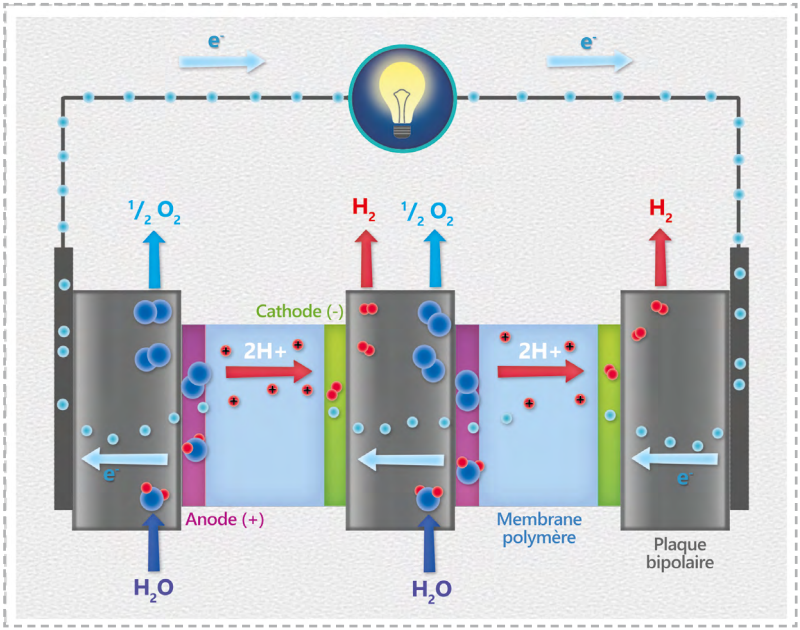


Figure 6

Schéma d'un électrolyseur d'eau à membrane polymère. Les électrodes (en vert sur la figure) sont séparées par une membrane « échangeuse d'ion » qui assure une simplicité et une robustesse au fonctionnement de l'électrolyseur.

Il existe d'autres procédés, purement chimiques, de production d'hydrogène. Le plus utilisé part d'un mélange de méthane (gaz naturel) et de vapeur d'eau. Grâce à l'utilisation de températures élevées (800 à 900 °C) en présence d'un catalyseur, il fournit de l'hydrogène. C'est **le procédé dit de « reformage ».** Les calories nécessaires peuvent être extraites des centrales de production d'électricité constituant ainsi une technique de stockage indirecte de l'électricité sous forme chimique.

Réseau de distribution de l'hydrogène

Un intérêt considérable de l'hydrogène est d'être transportable aisément vers tous les lieux d'utilisation. Il présente ainsi l'une des qualités du pétrole qui est éminemment transportable (sous forme d'essence ou de fuel), ce qui a permis le développement de l'automobile et plus généralement facilite considérablement la diffusion de l'énergie et de toute la technologie qui en dépend.

Sous forme de conteneurs, l'hydrogène peut être transporté vers des stations-service et permettre l'alimentation des voitures. Il existe aussi des réseaux de distribution d'hydrogène capables de fonctionner à l'échelle d'une région ou d'un pays. En France, ils sont déjà développés dans les régions de l'Est et des projets existent pour les généraliser. L'hydrogène prendra ainsi sa part pour permettre un usage « sans douleur » des énergies renouvelables malgré leur intermittence.

La voiture électrique, c'est vraiment l'avenir ?

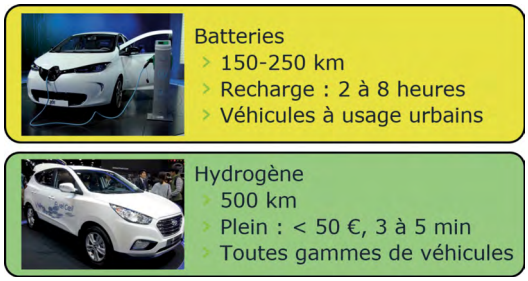
Toutes les voitures ont failli être électriques ! Ce n'est qu'à partir des années 1920 que les voitures à essence se sont révélées moins chères et se sont imposées (voir *Fig. 7*).

Figure 7 La voiture électrique Chevrolet. Detroit electric car, 1912.

Autonomie 130 km, 40 km/h
1907 : début de production (batterie au plomb ou batterie NiFe)
Succès années 1910-1920 (plus facile à démarrer que moteurs à combustion (manivelle))
1/3 des véhicules 1900-1920 sont électriques !
Années 20: production diminue.
Voitures à essence sont moins chères
Leur autonomie est plus grande

Les batteries lithium-ion permettent une autonomie d'environ 200 km à la voiture. C'est tout à fait insuffisant par rapport aux 600 km que permet l'essence. On a aussi une grande différence dans la vitesse de rechargement – le temps qu'il faut pour faire le plein - quelques minutes pour remplir son réservoir d'essence mais plusieurs heures pour recharger la batterie. L'utilisation de la batterie à la place de l'essence aujourd'hui obligerait à se limiter à des déplacements courts ou en ville – comme les bus ou les camions de livraison le font.

Figure 8



On peut corriger ces inconvénients des voitures électriques **en couplant une pile à combustible à une batterie au lithium.** Elle joue alors le rôle de « **prolongateur d'autonomie** »). On peut embarquer une quantité suffisante d'hydrogène dans son véhicule pour porter l'autonomie aux valeurs habituelles aujourd'hui – 600 km. La batterie au lithium est adaptée aux démarrages et à la conduite en ville. Quand sa charge baisse, la pile à combustible se met en route ; moins performante pour une conduite discontinue, elle peut garantir une bonne autonomie. L'équipement des routes en stations à hydrogène est activement mené dans certains pays d'Europe et permettra la généralisation du système dans les dix années qui viennent.

Décrivons ainsi la voiture du futur : Elle est à traction électrique grâce à une batterie qui lui donne une centaine de km d'autonomie (une batterie au lithium), mais elle dispose aussi d'un générateur (une pile à combustible) alimenté en carburant non fossile (l'hydrogène).

Le générateur est dimensionné pour permettre une vitesse du véhicule de 130 km/h et la puissance pour permettre les accélérations habituelles. On recharge la batterie à chaque fin de trajet sur le secteur. Les petits trajets du quotidien sont parcourus uniquement avec l'énergie contenue dans la batterie. On ne recourt au générateur que pour les grands trajets. L'hydrogène est bien adapté comme carburant pour le générateur ; on peut en stocker suffisamment dans sa voiture pour une autonomie de 600 km et faire le plein en cinq minutes.

Toutes ces caractéristiques demandent à être confirmées : le prix et la fiabilité ne sont pas encore assez assurés pour permettre une généralisation de ces systèmes automobiles.

Comment sera distribuée l'électricité demain ?

Regardons déjà **comment cela se passe aujourd'hui**. L'électricité est produite dans de très grosses installations, les centrales électriques qui peuvent être hydrauliques, nucléaires, à fuel, à gaz, à charbon et progressivement aussi « renouvelables ». De ces centrales partent de gigantesques réseaux de transports d'électricité, installations de lignes électriques à haute tension qui alimentent toutes les communes et toutes les villes. Dans ces dernières, des « transformateurs » adaptent le courant électrique aux usagers (par exemple en tension 220 volts). De là partent les lignes « basse tension » qui amènent l'électricité à toutes les maisons.

Figure 9

Même les lieux les plus isolés pourront bénéficier de l'électricité.

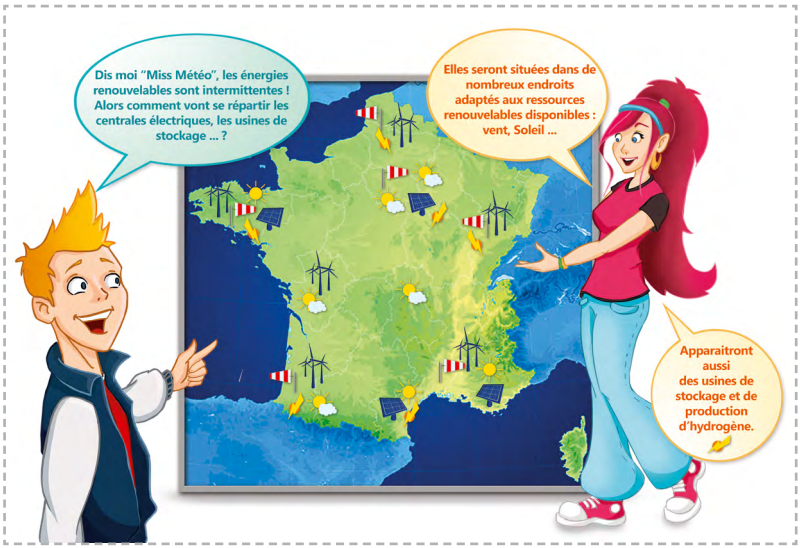
Dans le proche avenir, avec le développement des énergies renouvelables, les sources d'électricité (installations de production d'électricité) ne seront plus nécessairement de dimensions aussi importantes qu'à l'heure actuelle. Elles seront situées dans des endroits plus nombreux, le mieux adaptées possible aux ressources renouvelables disponibles (le vent ou le Soleil). Ainsi des **sources d'électricité seront installées un peu partout.** Elles pourront être très dispersées – éoliennes en petites installations, panneaux solaires

dans les villes ou les campagnes, gérées par des communes, des collectivités ou même des particuliers - même si de grosses installations industrielles (centrales électriques) – fermes solaires ou éoliennes - pourront aussi exister.

Une différence avec la situation actuelle vient de l'**intermittence des sources d'énergies renouvelables.** À côté des centrales de production d'électricité, se créera une activité industrielle « secondaire », celle des installations de stockage – STEP, usines de production d'hydrogène – qui sera adaptée au rythme de production des centrales renouvelables. Autre différence : la configuration des réseaux électriques sera très différente de ce qu'elle est aujourd'hui puisque le parc des centrales électriques sera différent.

Figure 10

Une nouvelle conception de l'énergie



D'autres installations industrielles « secondaires » seront les usines de fabrication d'hydrogène, soit par voie chimique, soit par électrolyseurs. On a vu que **l'hydrogène est un efficace moyen de stockage de l'énergie.** On utilise l'électricité quand elle est abondante pour produire le gaz, que l'on peut stocker pour l'utiliser plus tard et ailleurs pour les besoins en énergie ou en électricité.

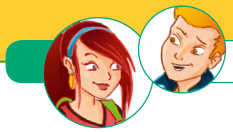
Le **remplacement des combustibles fossiles par les énergies renouvelables** constituera une révolution dans la distribution de l'électricité dans le futur. Les transports (avions, voitures, camions) consomment environ le tiers de l'énergie totale que nous consommons. Cette

quantité considérable d'énergie sera – au moins dans sa plus grande part remplacée par l'énergie électrique. Au lieu de voir l'énergie fossile être distribuée dans les stations-service sous forme d'essence ou de fuel, on verra se multiplier sur les routes les stations de recharge de batteries ou les stations de distribution de gaz hydrogène pour utilisation directe ou pour alimentation de piles à combustible. Cette évolution bien évidemment entraînera une véritable explosion des besoins en batteries : de grosses usines de fabrications verront le jour, et prendront la place des grosses raffineries de pétrole actuelles.

Bien sûr, ce scénario pour l'électricité du futur, est simplifié. Il dépendra en particulier dans ses détails des performances que prendront les voitures électriques des décennies à venir. On peut en retenir, sans risque de se tromper que nos habitudes de vie et nos paysages vont être transformés en profondeur.

Conclusion

Les énergies renouvelables pour être exploitées demandent de nouveaux concepts technologiques et de nouvelles installations – stockage d'électricité.
Les travaux de recherche conduits en particulier depuis le début du siècle ont apporté des solutions technologiques réalistes à ces nouvelles questions. Mais elles ne sont pour autant pas définitivement résolues.
Des études très nombreuses sont toujours en cours dans les laboratoires de recherche et chez les industriels. Elles portent en particulier sur questions de chimie : chimie du solide pour déterminer des matériaux d'électrode meilleurs ou moins chers, chimie des polymères pour comprendre et améliorer le fonctionnement des membranes des cellules, physicochimie pour trouver des catalyseurs moins coûteux et pour comprendre le vieillissement des composants et essayer de le contourner.
Bref, le travail est considérable pour conserver les performances actuelles des énergies fossiles…



LE CHALLENGE DE L'ÉLECTRICITÉ VERTE

Est-il possible de passer à 100 % de ressources énergétiques renouvelables, notamment pour alimenter notre réseau électrique ?

La réponse scientifiquement objective est oui, mais cela prendra du temps, coûtera beaucoup d'argent et nécessitera un important travail scientifique et technologique.

Les énergies renouvelables : un retour aux sources

Dans la brève histoire de l'énergie du chapitre « Le futur énergétique », il est intéressant de constater que :

- l'énergie solaire dont on parle tant aujourd'hui fut en fait la première des sources d'énergie utilisée par l'homme *via* la photosynthèse naturelle ;
- qu'il en est de même pour l'énergie éolienne avec les premiers moulins à vent.

Aujourd'hui, les particuliers et l'industrie ont en permanence besoin d'électricité en quantité immédiatement disponible, ce qui engendre de nouveaux défis.

Figure 1

L'électricité à tout moment et tout le temps : un vrai défi pour les scientifiques !

Les différentes sources d'énergie électrique possibles

Il faut avoir conscience que les sources d'énergie électrique utilisables dépendent des besoins et de la nature du consommateur qu'il soit ou non raccordé au réseau de distribution de l'électricité.

L'électricité du réseau français (et européen) est actuellement majoritairement produite en très grosse quantité par des sources centralisées (75 % des centrales françaises sont nucléaires) (*Figs. 2 et 3*), puis distribuée par des lignes à haute tension à travers un réseau de distribution et un réseau de transport (*Fig. 4*).

Remarque

Le choix des différentes ressources ne dépend pas uniquement de considérations scientifiques, il faut tenir compte des réalités économiques et géopolitiques de chaque pays (nombre d'habitants et d'industries, croissance économique, pays en développement, capacité à produire sa propre énergie en quantité suffisante…).

Figure 2

Évolution des filières énergétiques françaises et quelques dates clés : 1970 : appel d'offres pour 6 x 900 MWe (Mégawatt électrique) réacteurs à eau pressurisée (REP) Westinghouse ; 1973 : programme de plus de 28 REP-900 ; 1980 : renonciation à la licence Westinghouse ; années 1980 : déploiement de 20 REP-1300 ; années 1990 : déploiement de 4 REP-N4 ; 1992 : Lancement de l'EPR par NP-Int[a]. Source : IEA.

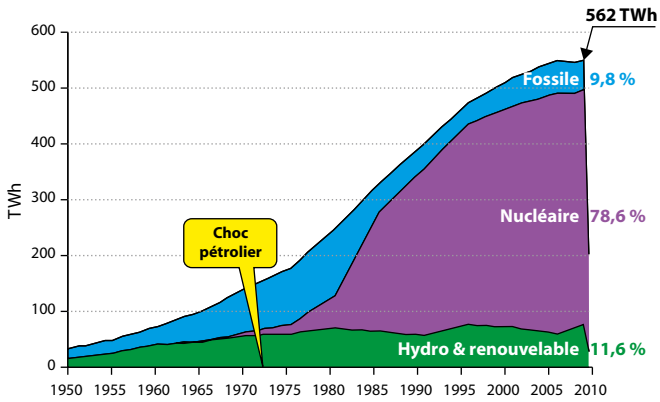


Figure 3

Distribution de l'électricité depuis la source jusqu'à son utilisation.

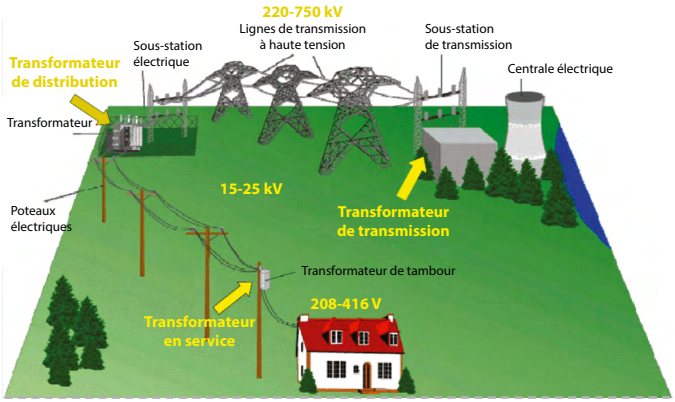
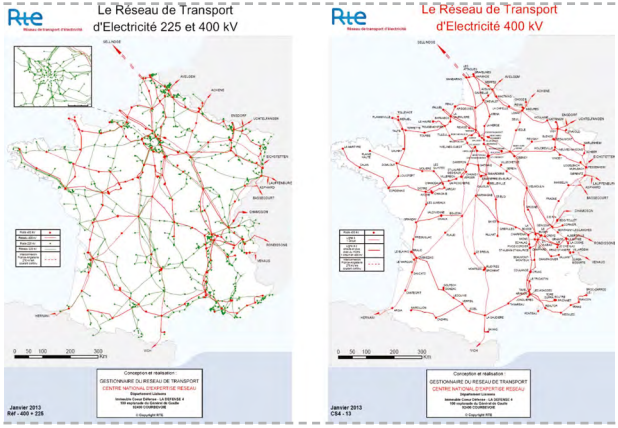


Figure 4

Le réseau de transport français d'électricité 225 kV et 400 kV (janvier 2013). Source : RTE.



Au contraire, les sources d'énergies renouvelables (solaire et éolienne) sont décentralisées et produisent de plus petites quantités d'énergie. Comment les intégrer dans le RTE qui est un réseau non seulement national mais européen ?

RTE : réseau de distribution de l'électricité.

La majorité des gens pensent actuellement que l'on peut, si on le veut, passer très rapidement à un panier énergétique presque 100 % renouvelable (2050).

Pour passer du nucléaire aux énergies renouvelables (l'électricité verte), il faut tenir compte de ce qui est scientifiquement et objectivement possible, entre autres :

- les énergies renouvelables ne sont gratuites que lorsqu'elles ne sont pas exploitées ;
- leur mise en œuvre demande des investissements lourds et leur utilisation dans le RTE ne pourra se faire qu'après la résolution d'un certain nombre de problématiques.

Les contraintes de la mise en place d'un réseau électrique « vert »

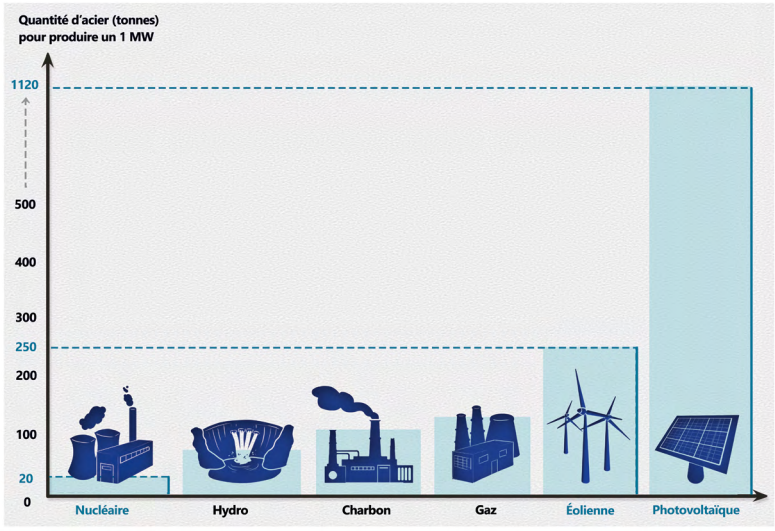
Le volume des matériaux utilisés

Un problème qui n'est pas des moindres est celui de la quantité de matériaux utilisés pour fabriquer des panneaux photovoltaïques ou des éoliennes. En effet, leur fabrication exige beaucoup plus de matériaux que le nucléaire (voir chapitre « De la force musculaire aux énergies renouvelables »).

La figure 5 compare la quantité d'énergie produite par tonne d'acier utilisée selon les différentes sources d'énergie qui l'utilisent. On voit que l'éolien et le phovoltaïque consomment plus de trois fois plus d'acier pour produire un mégawatt que le nucléaire.

Figure 5

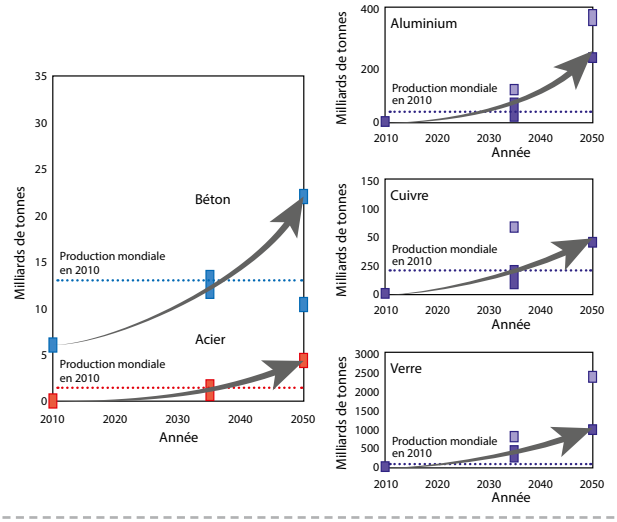
Quantité d'énergie produite par tonne d'acier par différentes sources d'énergie.



Dans ces conditions, il faut prendre conscience que pour développer le photovoltaïque et l'éolien, selon les prévisions politiques actuelles, il faudrait d'ici 2050 multiplier par deux à huit la production actuelle non seulement de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du cuivre et du verre (*Fig. 6*).

Figure 6

Besoins en matériau (aluminium, acier, cuivre, verre) pour les prévisions actuelles de développement du photovoltaïque et de l'éolien jusqu'en 2050.



Pour que cela soit réalisable dans le cadre de la production actuelle de ces matériaux, il ne faudrait pas construire de ponts, de voitures, de trains, de bâtiments pendant deux à huit ans !

Il est important de développer les énergies renouvelables mais il ne faut pas survendre et ignorer les problèmes.

L'intermittence

La plus grosse difficulté des énergies renouvelables repose sur leur intermittence (voir chapitre « De la force musculaire aux énergies alternatives »), c'est-à-dire qu'elles ne sont pas forcément disponibles au moment voulu, de plus elles dépendent des conditions météorologiques.

Il faut pouvoir compenser les fluctuations qui peuvent apparaître brutalement et pendant des durées très variables d'une seconde à une heure ou plus. Dans le cas notamment des éoliennes, les variations peuvent être très brutales et pas toujours prévisibles.

Quand il n'y a plus de vent dans une région, il faut aller le chercher au-delà et donc faire un maillage des zones de distribution, qui peut aller assez loin, voire à plusieurs centaines de kilomètres et il doit tenir compte des zones géographiques (montagne ou plaine) et des conditions météorologiques moyennes de la région.

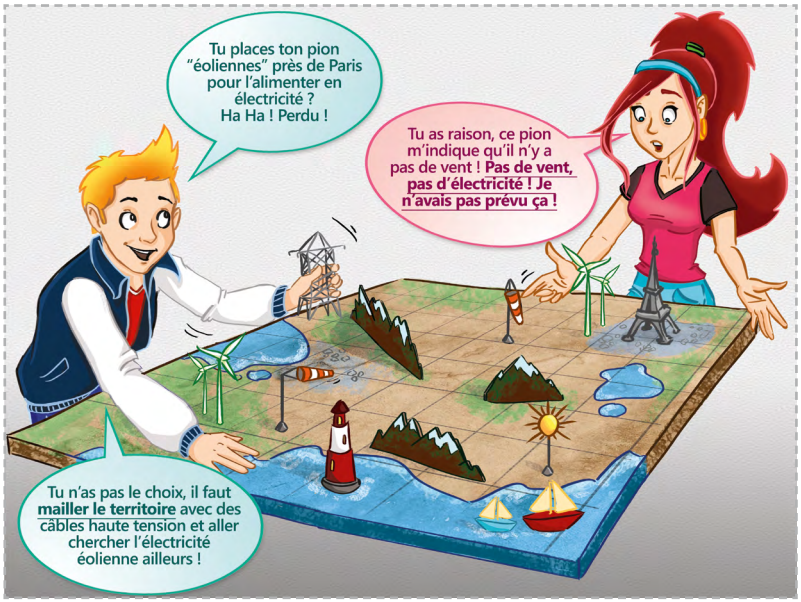
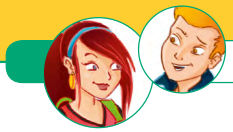


Figure 7

L'intermittence pose des défis importants pour intégrer l'électricité verte.



La délocalisation

Pour produire la même énergie qu'une centrale électrique nucléaire, il faudra prévoir un espace de production environ cinquante fois plus grand, et cela même dans le cas du solaire photovoltaïque dans le désert qui a pourtant la densité énergétique la plus élevée.

Le *tableau 1* montre le nombre de mètres carrés nécessaire pour produire un watt selon le type d'énergie renouvelable.

Tableau 1 **Densités énergétiques des énergies renouvelables.**

Source	Densité énergétique W/m²
Éolien	2,5
Plantes	0,5
Solaire photovoltaïque	5-20
Hydraulique piscine	3
Hydraulique au fil de l'eau	8
Solaire à concentration dans le désert	15-20

Pour diminuer la production d'électricité nucléaire de 75 à 50 % et compenser cette diminution par des énergies renouvelables, l'examen des ordres de grandeur (*Tab. 2*) montre qu'il faudra équiper en parcs d'énergies renouvelables, une surface égale à la superficie de l'Île-de-France et que le coût sera voisin de 300 milliards d'euros.

Tableau 2 **Comparaison en termes de surface de terrain et de coût des différentes énergies renouvelables envisagées pour remplacer le nucléaire en France pour aboutir à 50 %.**

	Éolien terrestre	Éolien mer	Solaire photo-voltaïque	Thermique
Surface par GW installé (km²)	142	80	32	0,32
Coût par GW installé (Md€)	1,99	3,33	3,74	1
Puissance à installer	50	19	35	42
Surface (km²)	7 092	1 520	1 117	13
Coût (en G€)	99	63	131	42
Coût total				335 Md€

Le stockage

Nous venons de voir que la production d'électricité issue de l'énergie renouvelable à un moment donné dépend d'une part de la météo, d'autre part de l'heure en ce qui concerne le photovoltaïque.

Planifier la consommation pour répondre aux pics d'utilisation est donc peu réaliste : on ne peut pas obliger les gens à prendre leurs repas, par exemple, à la même heure !

Les difficultés d'utilisation des énergies renouvelables ne sont évidemment pas les mêmes pour les particuliers pour lesquels il suffit de stocker localement de petites quantité d'énergie, et pour les centres urbains ou les sites industriels pour lesquels il faut centraliser le stockage de grosses quantités d'énergie pendant des durées plus longues.

Le STEP

Pour stocker de grosses quantités d'énergie pendant longtemps, le moyen le plus simple et le plus efficace est le STEP (*Fig. 8*).

STEP : station de transfert d'énergie par pompage.

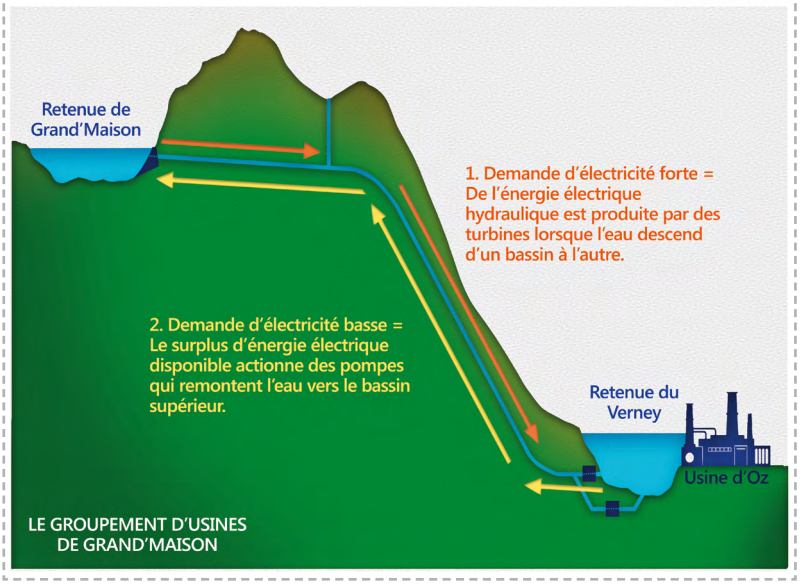


Figure 8

L'exemple du bassin de Grand'Maison.

On utilise le principe de production de l'électricité hydraulique. Quand la demande d'énergie est basse, le surplus d'énergie est utilisé pour

actionner une pompe qui permet de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur et l'énergie est inversement récupérée à partir d'une turbine hydraulique en cas de forte demande d'électricité, ou de pénurie de production.

La France ne dispose actuellement que d'une capacité de stockage de 4,9 GW, ce qui est faible par rapport aux 129 GW d'énergie renouvelable installés avec une durée de fonctionnement d'une vingtaine d'heures. Cela correspond à une production moyenne de 34 GW/h, ce qui est très faible quand on compare aux 540 TW/h de la consommation actuelle d'électricité.

Le procédé Power to gas

L'hydrogène vient se positionner en complément des STEP pour stocker de l'énergie en quantité importante sur une longue durée.

On peut stocker l'énergie électrique excédentaire produite par les sources renouvelables pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

$$H_2O \rightarrow H_2 + \tfrac{1}{2}O_2$$

Cet hydrogène peut être ensuite combiné à du gaz carbonique d'origine industrielle (pour éviter que ce dernier ne rejoigne l'atmosphère) pour produire du méthane CH_4 stocké pour une utilisation ultérieure.

Il faut néanmoins se poser la question du coût et des déperditions quand il faut transporter l'énergie stockée.

Les batteries

Les batteries sont actuellement moins performantes que les STEP pour le stockage de masse de l'énergie électrique nécessaire à l'industrie.

Figure 8

L'entreprise française Saft conçoit des batteries de haute technologie pour l'industrie. Crédit : Saft D. Edmunds CAPA Pictures.

Le stockage par STEP coûte actuellement trois fois moins cher que le stockage par batterie. Cependant, de nombreux laboratoires travaillent sur ce sujet et la société SAFT conçoit dès à présent ce type de batteries de haute technologie pour lesquelles de nouveaux matériaux doivent être développés (*Fig. 8*).

Les batteries lithium-air et les batteries à écoulement devraient, à terme, permettre de stocker de plus grosses quantités d'énergie par unité de masse, mais elles ne sont pas encore suffisamment fiables.

Actuellement, les batteries ne permettent pas de stocker l'énergie sur plusieurs jours, voire plusieurs semaines, en raison des problèmes d'auto-décharge, de volume et de masse utilisée. De plus, il faut les transporter ou les rassembler près de leur lieu d'utilisation.

Les conséquences d'une défaillance du réseau électrique

Un surplus ou un manque d'électricité peuvent déstabiliser un réseau qui est soumis à de fortes contraintes, et avoir des conséquences graves entre autres en raison de la dimension européenne des réseaux.

Ces contraintes sont aggravées avec l'arrivée des nouvelles sources intermittentes, peu prévisibles.

Le *tableau 3* reporte quelques gros *black-out* qui ont eu lieu de par le monde ces dernières années.

Tableau 3 **Historique des blackouts importants.**

	Profondeur	Date
Italie	50 millions d'habitants	29 septembre 2003
États-Unis (New York)	55 millions d'habitants	14 août 2003
Indonésie	100 millions d'habitants	18 août 2005
Brésil et Paraguay	87 millions d'habitants	10 novembre 2009
Inde	670 millions d'habitants	31 juillet 2012

En France, EDF a l'obligation, en cas de panne, d'amener les personnes qui ont un besoin impératif d'électricité dans les hôpitaux qui sont équipés en groupes électrogènes.

Remarque

Les dysfonctionnements peuvent être lourds de conséquences puisque l'électricité est utilisée par toutes les activités de domaines multiples et variés : industriels, sanitaires, Défense nationale, cybersécurité…

EDF : Électricité de France.

EDF peut raisonnablement gérer une complication si elle se limite à une ville, à un canton, à la limite à un département, mais cela devient très difficile pour une région.

Quand on analyse les grandes pannes, il n'est pas exclu de mettre plusieurs jours, voire une semaine pour remettre le réseau en marche.

C'est donc un vrai défi industriel et un problème de santé publique de disposer d'aides idéalement situées pour un coût raisonnable.

Conclusion

Les énergies renouvelables jouent et joueront un rôle important dans la production d'électricité. Une solution rapide 100 % renouvelable en France n'est pas envisageable à court terme puisqu'il reste encore beaucoup de progrès à faire pour réussir à stocker durablement l'énergie. Il ne faut pas négliger les lois de la physique qui ne sont pas négociables et les investissements financiers indispensables pour passer du nucléaire au « vert ».
N'oublions jamais le bon sens dans toutes les démarches, l'objectif majeur étant de décarboner l'énergie.

LE CO_2, MATIÈRE PREMIÈRE DE LA VIE

Le dioxyde de carbone (CO_2) est un gaz présent dans notre atmosphère, il est constitué d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène.

Comme certains voudraient maintenant le faire penser, le CO_2 n'est pas en premier lieu un gaz néfaste dont il faut se débarrasser, **il est indispensable à la vie**. En effet dans la nature, la photosynthèse est un cercle vertueux où le CO_2 et le Soleil nourrissent l'homme et où l'homme en respirant redonne le CO_2 à la nature. Sans CO_2, la vie n'existerait pas sur Terre.

Les organismes vivants (plantes, microalgues, cyanobactéries) réalisent cette réaction parce qu'ils ont besoin de cette énergie stockée sous forme chimique afin d'alimenter en énergie, leur métabolisme et leur biosynthèse (voir *Fig. 6* dans le chapitre « De la force musculaire aux énergies renouvelables).

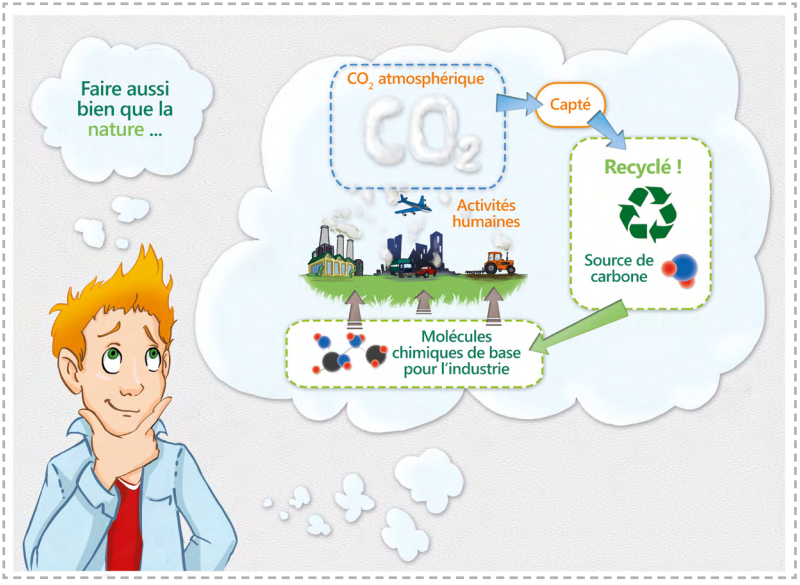


Figure 1

Le rêve des chimistes.

La photosynthèse est la réaction chimique du CO_2 avec l'eau qui permet de récupérer naturellement l'énergie solaire nécessaire à la production de toutes les molécules organiques de la biomasse.

Les cyanobactéries (ou encore algues bleues) sont des bactéries, qui comme les plantes, utilisent l'énergie solaire pour synthétiser leurs molécules organiques.

La biosynthèse est la formation de substances par un être vivant, dans son milieu interne.

L'effet de serre est un phénomène thermique dans lequel l'atmosphère laisse passer une partie du rayonnement solaire qui vient frapper le sol. Réchauffé, celui-ci émet un rayonnement infrarouge en partie ou totalement piégé par l'atmosphère rendue « imperméable » par la présence de gaz. On observe alors une isolation accrue de la planète et un réchauffement global de celle-ci (voir chapitre « Le changement climatique »).

CO_2 anthropogénique : CO_2 produit par l'homme au travers des transports et du chauffage principalement (toute combustion de matière organique réalisée par les hommes).

Remarque

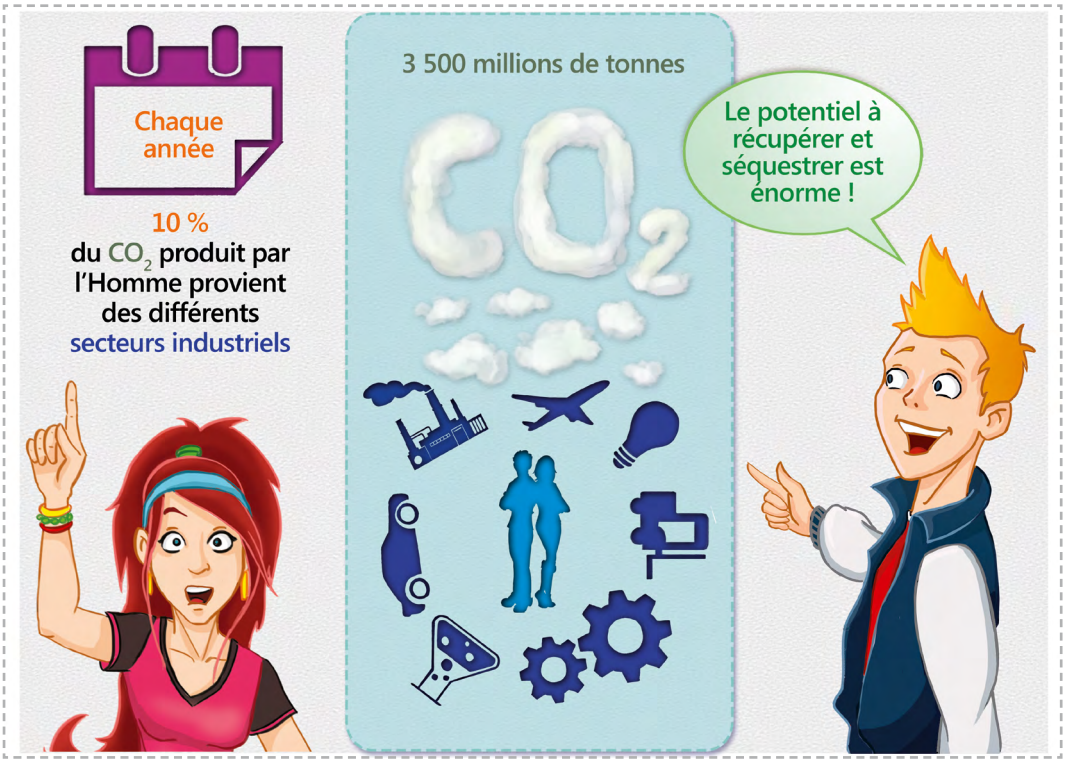
Le rêve des chimistes : sur ce modèle, le CO_2 atmosphérique issu des activités humaines pourrait être utilisé comme source de carbone. De plus, sa capture et sa séquestration permettraient de limiter l'effet de serre.

10 % du CO_2 anthropogénique, soit 3 500 millions de tonnes, sont produits annuellement par les différents secteurs industriels : métallurgie, raffineries, cimenteries, centrales thermiques, ce qui représente un potentiel important à récupérer et à séquestrer (*Fig. 2*).

On ne peut évidemment pas recueillir le CO_2 issu des pots d'échappement des voitures. Il serait difficile à collecter et à stocker pour être réutiliser.

Figure 2

Le CO_2 atmosphérique, un potentiel énorme !



La capture du CO_2 d'origine industrielle

Les technologies les plus évoluées sont basées sur deux principes (*Fig. 3*) :

- **l'absorption chimique** par réaction chimique entre le CO_2 et une base (mono ou di éthylamine) qui conduit à des composés stables dont il peut ultérieurement être extrait ;
- **la cryogénie** est aussi une technique bien développée à l'échelle industrielle dans laquelle le CO_2 est stocké sous forme de glace sèche (*Fig. 3*).

Cryogénie : refroidissement en dessous de - 150 °C.

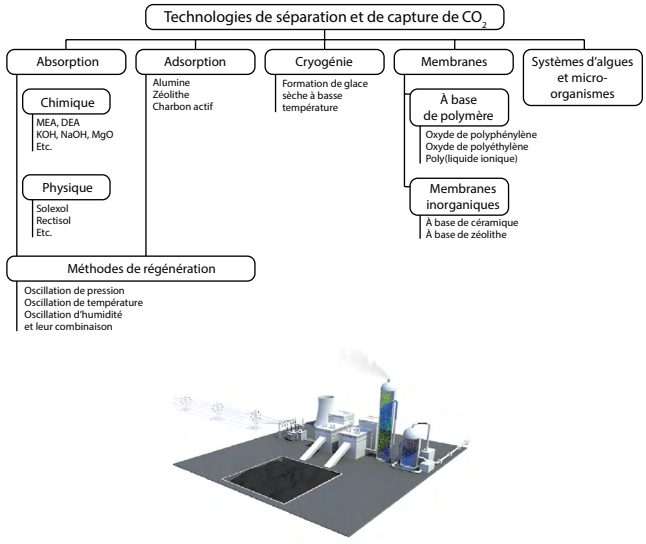


Figure 3

Capture industrielle de CO_2 et modélisation d'une usine.

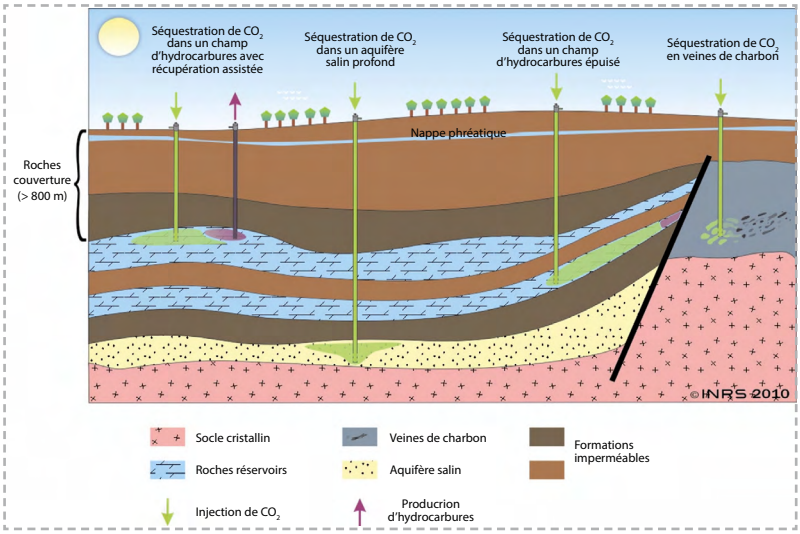
Cependant, ces technologies restent coûteuses et demeurent donc un sujet de Recherche et Développement.

Le stockage du CO_2 d'origine industrielle

Différents sites géologiques adaptés sont utilisables pour stocker le CO_2 récupéré (*Fig. 4*).

Figure 4

Les différents types de séquestration géologique envisageables du CO_2.



Remarque

Ce n'est donc pas uniquement la capture et la séquestration du CO_2 qui résoudront le problème du réchauffement climatique si celui-ci en est le seul responsable.

D'un point de vue pratique, il faut que les sites de production de CO_2 soient proches des sites de stockage. Il faut s'assurer de la sécurité optimale des sites de stockage et communiquer avec la population pour qu'ils soient acceptés localement.

Le stockage chimique des énergies renouvelables via la transformation du CO_2

Un Terawatt (TW) = 10^{12} watts soit un billion de watts, un Gigawatt (GW) = 10^9 watts soit un milliard de watts, un Megawatt (MW) = 10^6 watts soit un million de watts.

Nous avons vu au début de ce chapitre, que le stockage massif du CO_2 à la surface de la Terre est mis en œuvre par les organismes vivants. Le Soleil envoie 100 000 TW/an sur la planète dont 100 TW sont transformés en biomasse, ce qui est bien au-dessus de nos besoins car nous ne consommons actuellement que 16 TW/an (*Fig. 5*).

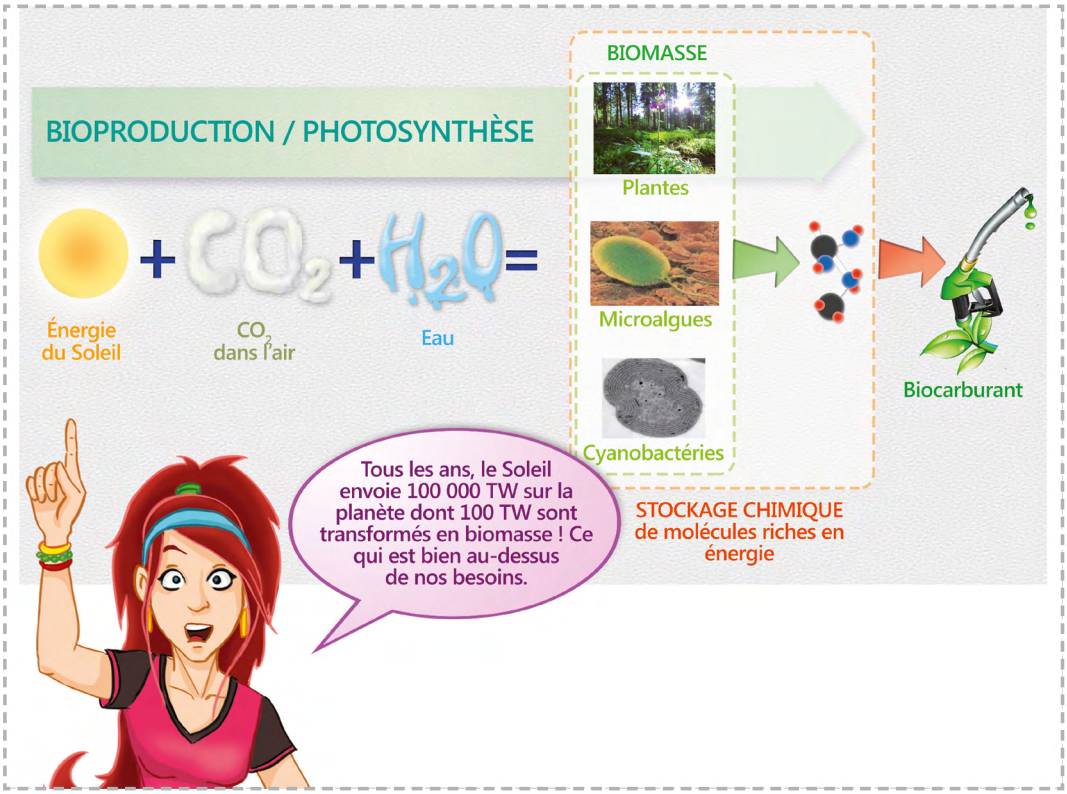


Figure 5

Le recyclage du CO_2 via le stockage chimique.

Cette biomasse représente donc une énorme réserve de molécules riches en énergie et le défi posé depuis longtemps, est de l'utiliser pour produire des biocarburants (voir chapitre « Biomasse et biocarburants »).

Le recyclage actuel de CO_2 par l'industrie

Il y a actuellement 3 000 gigatonnes de CO_2 dans l'atmosphère alors que la production par l'homme est de 30 Gt/an.

L'industrie sait pourtant produire des molécules utiles à partir du CO_2. Celles-ci sont assez simples (*Tab. 1*).

Remarque

L'industrie consomme actuellement 150 Mt/an du CO_2 produit par l'homme, c'est-à-dire moins de 0,5 % ; ces chiffres indiquent que cette utilisation n'est pas actuellement destinée à résoudre les problèmes de changement climatique associés au CO_2.

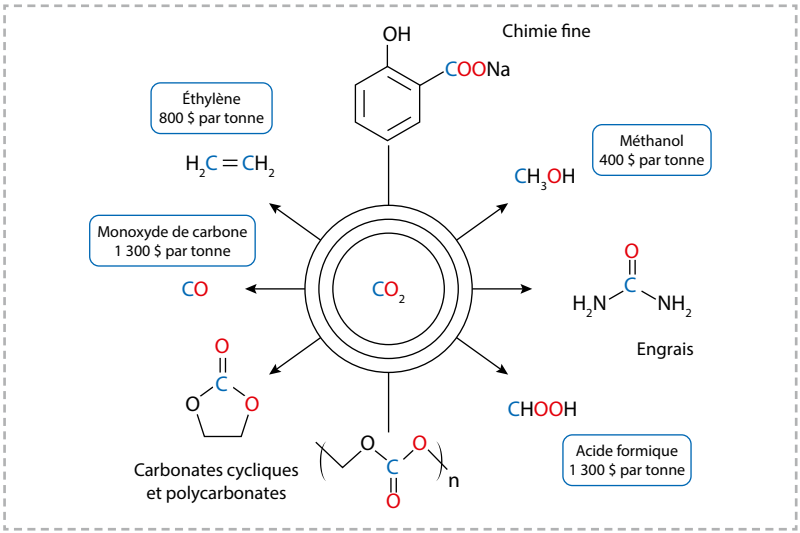
Tableau 3 **Part annuelle des différentes utilisations industrielles du CO_2.**

Produit chimique ou application	Volume industriel (millions de tonnes par an)	Utilisation industrielle de CO_2 (millions de tonnes par an)	Utilisations futures attendues de CO_2
Urée	100	70	10^2 millions de tonnes
Méthanol (additif à CO)	40	14	Gigatonnes
Carbonates inorganiques	80	30	-
Carbonates organiques	2,6	0,2	10^2 millions de tonnes
Acide salycilique	0,06	0,02	10^2 kilotonnes
Technologies	10	10	
Alimentaire	8	8	

Les tonnages actuels produits sont faibles mais on peut faire beaucoup mieux car les utilisations potentielles attendues sont importantes. La *figure 7* montre les molécules organiques d'intérêt industriel qui peuvent dès à présent être synthétisées à partir de CO_2.

Figure 7

De nombreuses molécules organiques d'intérêt industriel peuvent être synthétisées à partir du CO_2.



Les valorisations de CO_2 en cours de développement

La conversion de CO_2 en polymères (résines et polycarbonates) présente l'intérêt de fixer une grosse quantité de CO_2 pendant longtemps avec une bonne faisabilité (voir reportage dans la partie III « Le plastique qui recycle le CO_2 »).

L'hydrogénation de CO_2 en méthane (réaction de Sabatier connue depuis longtemps) peut être réalisée en présence de catalyseur.

$$CO_2 + 4\ H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$$

Cette réaction peut être intégrée dans un cycle de stockage d'énergie intermittente (voir chapitre « Le challenge de l'électricité verte ») (*Fig. 8*).

L'éolienne et le panneau solaire produisent de l'électricité sans production de CO_2 :

- le surplus d'électricité peut être stocké sous forme d'hydrogène par électrolyse de l'eau (voir reportage dans la partie III « L'éponge à hydrogène ») selon la réaction $2H_2O \rightarrow O_2 + 2H_2$;
- l'hydrogène est utilisé pour réagir avec le CO_2 d'origine industrielle afin de produire du méthane qui sera employé industriellement ou réinjecté dans le circuit gaz et production d'énergie.

Remarque

La photosynthèse naturelle est étudiée depuis au moins 50 ans par les chimistes, les physiciens et les biologistes et on commence à en comprendre les règles de fonctionnement. Cela permet d'envisager la **mise au point de photosynthèse artificielle par une approche de chimie bio-inspirée.** Pour ce faire, les chimistes recherchent de nouveaux matériaux catalyseurs qui permettent de faire aussi bien que la nature.

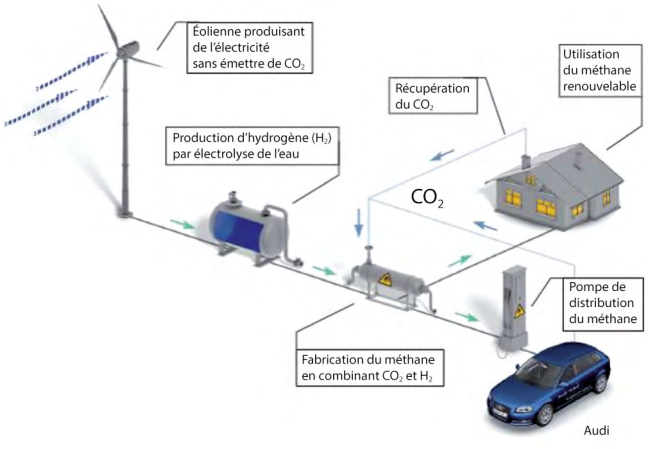


Figure 8

Cycle de la méthanation.

Conclusion

Rappelons ce très beau texte de Primo Levi (1919-1987)(dernier chapitre de l'ouvrage « le système périodique »).

« L'anhydride carbonique constitue la matière première de la vie, la provision permanente dans laquelle puise tout ce qui croît, et l'ultime destin de toute chair, n'est pas un des composants principaux de l'air, mais un minuscule déchet, une impureté … c'est de cette impureté toujours renouvelée que nous venons, nous les animaux, nous l'espèce humaine. Quand nous aurons appris à en faire autant nous aurons résolu le problème de la faim dans le monde ! »

À l'époque de Primo Levi, le problème à résoudre était celui de la faim et non celui du réchauffement climatique.

Figure 9

De belles perspectives d'avenir…

La recherche sur le CO_2 n'en est qu'à ses débuts. Les chercheurs académiques et industriels doivent y travailler ensemble.

Il faut investir dans ce domaine comme cela est déjà compris et fait dans d'autres pays : en Allemagne, aux États-Unis et en Chine (4,5 milliards de dollars sur cinq ans) alors qu'il n'existe encore aucun programme spécifique en France.

3 PARTIE

LES CHIMISTES AU SERVICE DU MIX ÉNERGÉTIQUE

LES CHIMISTES ET L'ÉNERGIE DANS LE MONDE

En 2014, six couples d'étudiants, journalistes et chimistes sont partis caméra au poing, explorer les contributions des industriels de la chimie aux défis de la transition énergétique.

Leurs vidéos sont accessibles sur http://actions.maisondelachimie/world_tour_2014.html

Ces reportages montrent que grâce à la chimie :

- on a une nouvelle colle époxy avec laquelle on peut presque tout coller dans une voiture, notamment les éléments de carrosserie réalisés en nouveaux matériaux 30 % plus légers, ce qui permet de réduire la consommation de carburant et la production de gaz à effet de serre (reportage de Tyna et Sylvain) ;

- l'énergie est stockée sous forme d'hydrogène, en toute sécurité, sous un volume réduit et pendant longtemps dans des galettes, pour une utilisation ultérieure dans les véhicules électriques ou dans l'industrie (reportage de Marion et Hady) ;
- un nouvel aérogel permet, à performances égales, de réduire de 50 % l'épaisseur des panneaux d'isolation thermique (reportage de Marie et William) ;
- les performances des batteries des véhicules électriques doivent beaucoup à un nouveau poly fluorure de vinylidène (reportage de Anna et Axel) ;
- on peut contribuer à la diminution des gaz à effet de serre en dormant sur un nouveau et très confortable matelas (reportage de Marie et Estéban) ;
- l'avion solaire n'aurait sans doute pas fait le tour du monde si les cellules photovoltaïques qui couvrent ses ailes n'étaient pas protégées par un nouveau film polymère transparent et très résistant (reportage de Fleur et Pierre).

Nous allons vous raconter leur périple ; venez découvrir la fabrication sur site industriel de toutes ces innovations et constater que derrière tout cela se cachent de nombreux métiers passionnants et porteurs pour votre avenir.

La colle qui contribue à économiser la consommation de carburants

Destination Suisse/Allemagne et France : Tina (journaliste IEJ, Paris) et Sylvain (élève ingénieur ENSGTI, Pau) sont partis étudier une nouvelle colle.

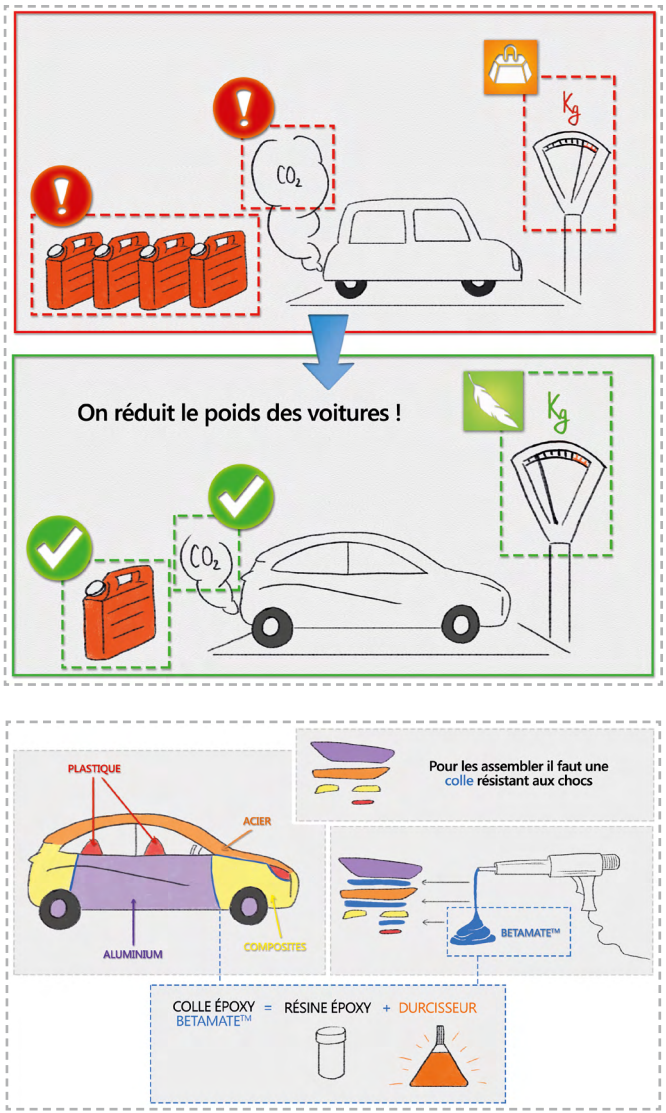
Pour réduire la consommation des carburants fossiles et diminuer par la même occasion la production de CO_2, un bon moyen est de diminuer

le poids des véhicules en remplaçant le maximum de pièces métalliques des carrosseries, par de nouveaux matériaux plus légers.

Mais pour assembler ces nouveaux matériaux, on a besoin d'une colle qui résiste aux chocs même violents (*Fig. 1*).

Figure 1

Quelle solution pour réduire la consommation des énergies fossiles et émissions de CO_2 ?



Renault travaille à la mise au point de ce type de véhicule, et Philippe Michel, expert adhésifs structuraux chez Renault, explique à Tyna et Sylvain que ce type d'approche permet, par exemple, de réduire le poids d'une Clio de 1 400 à 900 kg. On voit sur la *figure 2* un exemple de pièces de carrosserie collées.

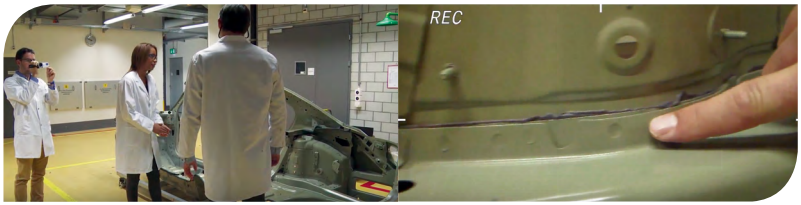


Figure 2

Pièces de carrosserie collées.

Pour réaliser ces voitures, Renault utilise la colle **Betamate** qui a été créée et mise au point dans le centre de Recherche et Développement de Dow chemicals, à Horgen en Suisse, tout près de Zurich. Tyna et Sylvain y ont rencontré le Dr Stéphane Schmatloch, directeur R&D, pour découvrir **la recette de la fabrication du betamate** (*Fig. 3*).

Une résine époxy est mélangée avec des pigments pour la couleur souhaitée et un **agent épaississant, dont la formule est un secret industriel,** y est ajouté qui **va donner à cette colle ses propriétés exceptionnelles, notamment l'absorption de l'énergie lors de crash.**

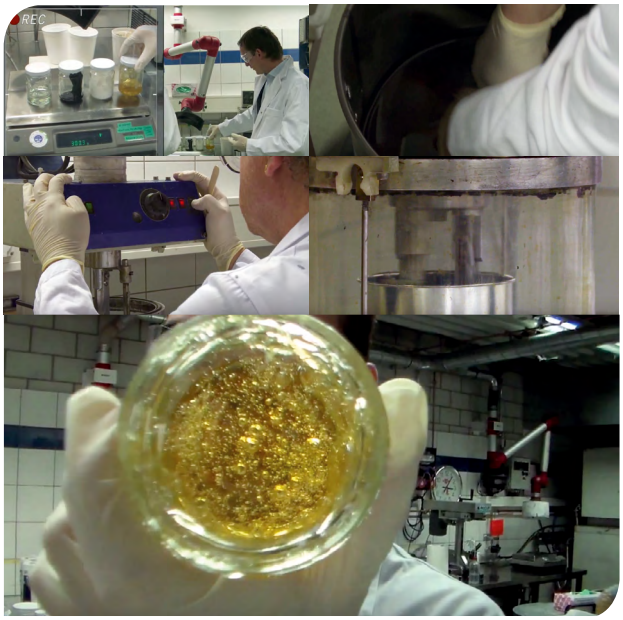


Figure 3

La préparation du Betamate en laboratoire.

Remarque

Le betamate peut aussi être utilisé pour coller l'acier, l'aluminium, le magnésium et remplacer avantageusement les soudures et fixations métalliques.

Les tests en laboratoire spécialisé permettent de vérifier et d'améliorer les performances de collage et les résistances au crash-collision (*Fig. 4*).

Figure 4

Test de resistance au crash–collision des pièces collées au betamate.

La fabrication industrielle du betamate est réalisée en Allemagne dans l'usine de Schkopan.

Elviera Muller, chef des opérations, fait visiter l'atelier de fabrication à nos deux reporters (*Fig. 5*).

Figure 5

Atelier de fabrication du betamate.

La qualité de la fabrication est vérifiée sur chaque lot préparé (*Fig. 6*).

Figure 6

Test qualité de production du betamate.

Les différentes étapes de la fabrication sont automatisées et conduites à partir d'un centre de contrôle (*Fig. 7*).

Figure 7

Le centre de contrôle automatisé de fabrication du betamate.

Le directeur commercial explique les nombreuses variétés (20) de betamate péparées et leurs diverses applications (*Fig. 8*).

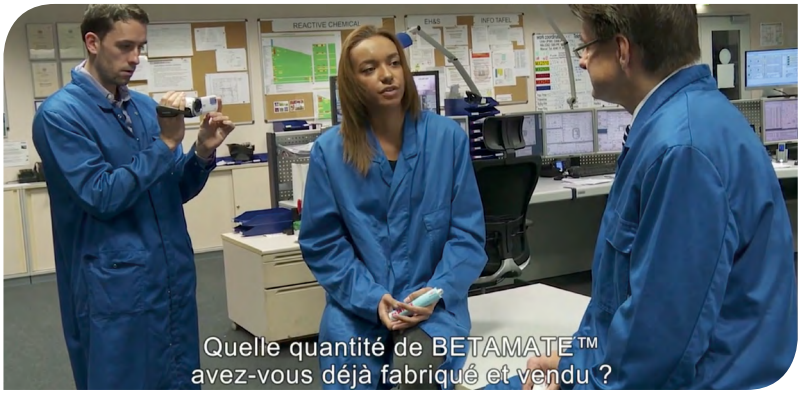


Figure 8

Variétés de betamate proposées au client selon le type d'application.

L'éponge à hydrogène : une solution pour le stockage des énergies renouvelables

Destination Grande-Bretagne (et France) : Marion (journaliste IEJ, Paris) et Hady (élève ingénieur ENSIC, Nancy) partent à la découverte de l'éponge à hydrogène.

Nous avons vu précédemment (voir chapitre « Le challenge de l'électricité verte ») que le problème majeur pour développer les énergies renouvelables était leur intermittence et donc de pouvoir stocker de l'énergie quand il y a du vent ou du soleil, pour pouvoir récupérer cette énergie quand on en a besoin.

L'électricité peut être stockée sous forme chimique en l'utilisant pour électrolyser l'eau avec production d'oxygène et d'hydrogène selon la réaction :

$$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$$

La *figure 1* montre le prototype d'électrolyseur industriel du laboratoire qui réalise des tests sur le stockage de l'hydrogène à l'université de Nottingham en Angleterre.

Figure 1

Électrolyse de l'eau pour stocker l'énergie sous forme d'hydrogène.

Le professeur Gavin Walken montre à Marion et Hady comment l'hydrogène est récupéré et stocké, pour être ensuite réutilisé pour produire de l'électricité en employant la réaction inverse dans une pile utilisant l'hydrogène comme combustible : la pile à combustible (voir chapitre sur le stockage).

Stocker de l'hydrogène sous pression, d'une part prend de la place, d'autre part pose des problèmes de sécurité car l'hydrogène est un gaz inflammable qui peut conduire avec l'air à un mélange explosif dans certaines conditions.

Résoudre ce problème a été l'objectif de la société française McPhy Energy localisée à la Motte-Fanjas, qui exploite une licence CNRS sur **le stockage de l'hydrogène sous forme solide** mis au point au laboratoire CNRS Louis Néel.

Cédric Dupuis, ingénieur de R&D, explique le principe de fonctionnement et l'intérêt de cette **véritable éponge à hydrogène** (*Figs. 2 et 3*).

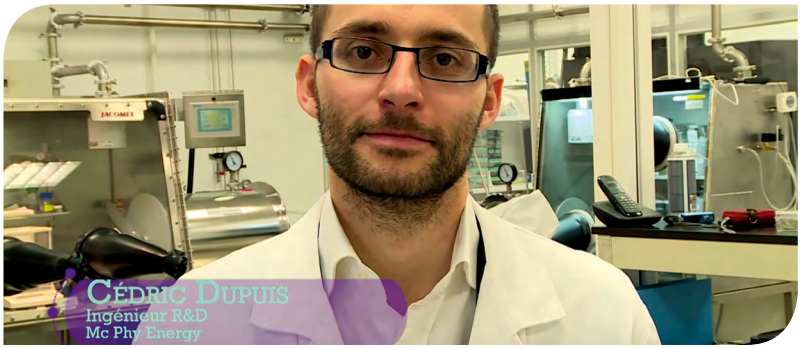


Figure 2

Cédric Dupuis, ingénieur de R&D chez McPhy Energy.

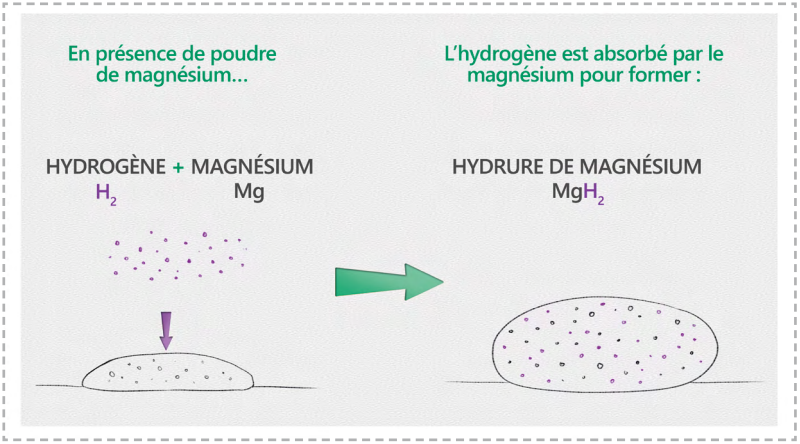


Figure 3

Principe de l'éponge à hydrogène.

Remarque

Cette réaction est lente et prend plusieurs heures.
Le procédé innovant mis au point au CNRS permet de faire cette réaction en quelques minutes.

On sait depuis longtemps que le magnésium stocke l'hydrogène sous forme d'hydrure de magnésium MgH_2 selon la réaction :

$$Mg + H_2 \rightarrow MgH_2$$

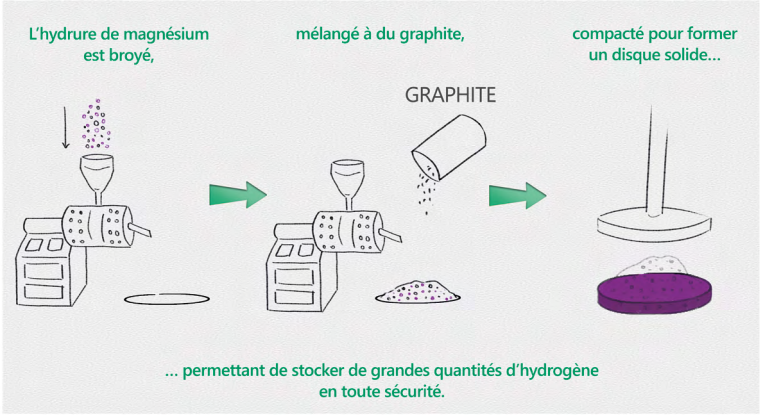


Figure 4

Fabrication de la galette d'hydrure de magnésium.

Remarque

La seconde innovation consiste fabriquer des galettes d'hydrure de magnésium en compactant sous presse la poudre broyée et mélangée à du graphite. 600 litres d'hydrogène peuvent être stockés dans chaque galette (*Fig. 4*).

Ces galettes permettent de stocker l'hydrogène, en toute sécurité en attendant son utilisation par un industriel, pour un véhicule électrique, ou pour l'injecter dans le réseau de gaz (*Fig. 5*).

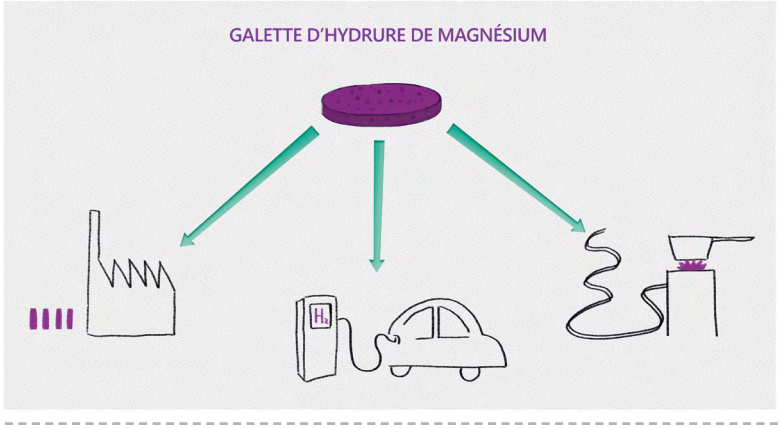


Figure 5

Les utilisations des galettes à hydrogène.

Économiser l'énergie : la slentite, un nouveau matériau qui améliore de 50 % l'isolation des bâtiments

Destination Allemagne et France : Marie (doctorante ICPEE, Strasbourg) et William (journaliste IEJ, Paris).

La meilleur façon d'économiser l'énergie est l'isolation : une bonne isolation permet plus de 35% d'economie de chauffage l'hiver et de ne pas avoir trop chaud en été.

De nombreux matériaux isolants sont issus de la chimie, les plus connus étant le polystyrène et le polyuréthane expansé. Ces deux matériaux contiennent plus de 95 % d'air, immobilisé dans des pores ce qui en fait des bons isolants. **Ces polymères expansés isolants sont obtenus à partir de mousses.**

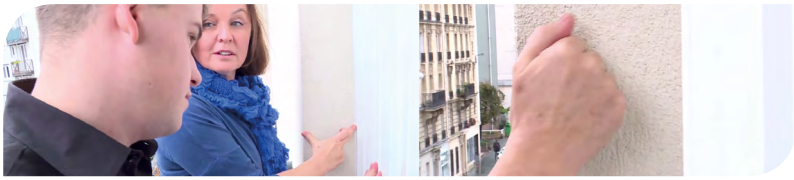
Afin de ne pas diminuer la surface habitable, surtout dans le cas d'une rénovation, on isole souvent les murs d'une maison avec des panneaux extérieurs. Les panneaux actuellement utilisés comme isolants de façade ont une épaisseur d'environ 20 cm.

Il est très intéressant de pouvoir diminuer l'épaisseur de ces panneaux isolants pour en faciliter l'utilisation, et encore plus si veut les utiliser en intérieur.

Guillaume Dethan, **expert en construction durable,** explique à Marie et William que l'objectif de BASF a donc été d'améliorer de 50 % la qualité de l'isolation, en divisant par deux l'épaisseur tout en gardant les mêmes performances d'isolation (*Fig. 1*).

Figure 1

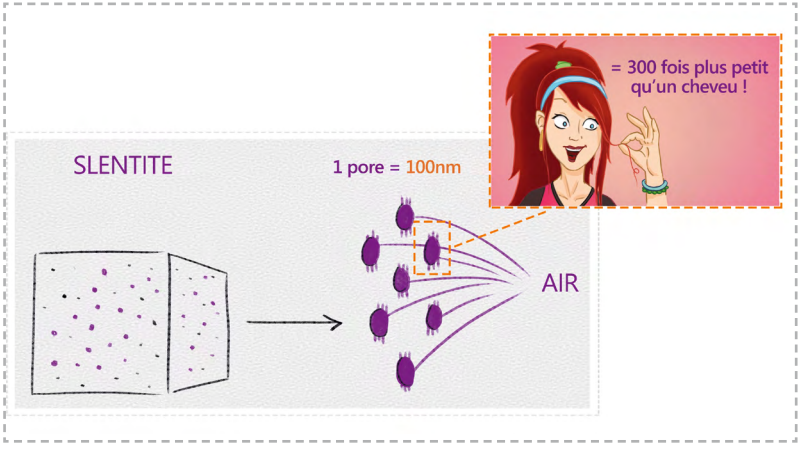
Même isolation thermique avec une épaisseur de panneau divisée par 2.



C'est la quantité d'air emprisonné dans les pores qui crée l'isolation. Pour emprisonner la même quantité d'air dans un volume deux fois plus petit, il faut diminuer la taille des pores et les remplacer par des nanopores (*Fig. 2*).

Figure 2

Un nanopore est une cavité qui a un diamètre de l'ordre du nanomètre c'est-à-dire 5000 fois plus petite qu'un cheveu.



Pour obtenir ce résultat, les chercheurs de BASF ont remplacé la mousse polymère de départ par un aérogel et ont créé la slentite. Marie et William sont allés visiter le Centre de R&D de BASF à Lemford en Allemagne où a été créée et où est fabriquée la slentite (*Fig. 3*).

Figure 3

Marc Frick chef de projet et inventeur de la Slentite.

La slentite est le premier aérogel organique issu de la chimie des polyuréthanes.

Sa nanostructure le rend plus résistant à la pression, et plus facile à découper que les plaques obtenues à partir des mousses.

Marc montre sur la *figure 4* l'aérogel obtenu à partir du gel de polyuréthane par **séchage cryogénique en milieu super critique.**

Comme dans le cas des mousses, le gel de polyuréthane est préparé par la réaction de polyols avec de l'isocyanate. **Mais selon les fonctionnalités des polyols et la composition du milieu réactionnel, on obtient un gel mesoporeux au lieu d'une mousse.** Bien entendu, cette composition est un secret industriel qui résulte d'un travail de recherche en partenariat avec le laboratoire ISIS (Institut de Science et d'ingénierie supramoléculaire de Strasbourg).

La visite se termine par celle du showroom de BASF (*Fig. 5*) qui présente toutes les formes possibles d'obtention des panneaux de slentite utilisable aussi bien pour l'isolation extérieure qu'intérieure.

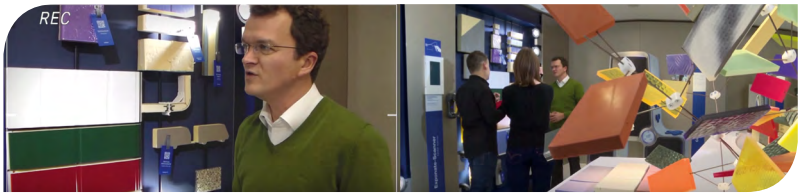


Figure 4

Les différents types de panneaux de slentite.

Un aérogel est un gel dans lequel on remplace le liquide par un gaz. Sa structure moléculaire crée des nanopores ouverts dans lesquels les molécules d'air emprisonnées ne peuvent pas circuler à travers le maillage de la structure, ce qui conduit à des propriétés isolantes remarquables (Fig. 2). Très léger, il peut contenir jusqu'à 99, 8 % d'air, c'est-à-dire beaucoup plus que les mousses.

Figure 4

Gel de polyurethane.

Séchage supercritique : Un gaz est dans les conditions supercritiques quand on ne peut plus distinguer la phase liquide de la phase gazeuse. Le matériau à sécher est introduit dans un autoclave et soumis à un balayage de CO_2 à une température supérieure à sa température critique (30,98 °C) et à une pression supérieure à sa pression critique (73,77 bars). Dans ces conditions, le CO_2 s'échange avec le solvant de synthèse contenu dans les pores du gel. Une détente est ensuite effectuée, ce qui permet d'évacuer le CO_2 et d'obtenir le squelette solide de l'aérogel.

Le Kynar® PVDF, un polymère indispensable au développement du véhicule électrique

Destination Chine : Région de Shanghai (Changshu à 120 km au nord de Shanghai) pour Anna (élève ingénieur ECPEM, Strasbourg) et Axel (étudiant journaliste IEJ, Paris)

Le véhicule électrique n'est pas une alternative au véhicule thermique. Il a son propre marché qui est important notamment en milieu urbain pour diminuer la pollution et c'est particulièrement le cas pour les grandes métropoles chinoises.

La Chine investit donc beaucoup dans le véhicule électrique : il est notamment prévu d'ici 2020, 150 millions de scooters électrique et cinq millions de voitures électriques ainsi qu'un investissement de 13 milliards d'euros d'aide aux municipalités pour s'équiper en bornes de recharge.

Dès à présent, comme Anna et Axel, on circule en scooter électrique (*Fig. 1*) à Shanghai et en 2015, plus de 170 000 véhicules électriques et hybrides rechargeables ont été commercialisés. Le principal fournisseur d'énergie en Chine a pour ambition d'installer 10 000 bornes de recharge rapide qui permettent de retrouver 80 % de la capacité en 30 min.

Figure 1

Anna et Axel en scooter électrique.

Il n'est donc pas étonnant que 95 % des batteries pour véhicule électrique soient actuellement fabriquées en Chine. Ces batteries utilisent actuellement la technologie

Lithium-ion mais il faut toujours en augmenter :

- la puissance ;
- l'autonomie ;
- la rapidité de la recharge.

C'est précisément la fonction du polymère Kynar® PVDF fabriqué par le groupe français Arkema qui est un liant de choix pour augmenter les performances des batteries et leur longévité et faciliter la charge et la décharge.

Anna et Axel sont donc allés visiter le centre de Recherche et Développement d'Arkema à Changshu à 120 km au nord de Shanghai où est mis au point et fabriqué le Kynar® PVDF (*Fig. 2*).

Figure 2

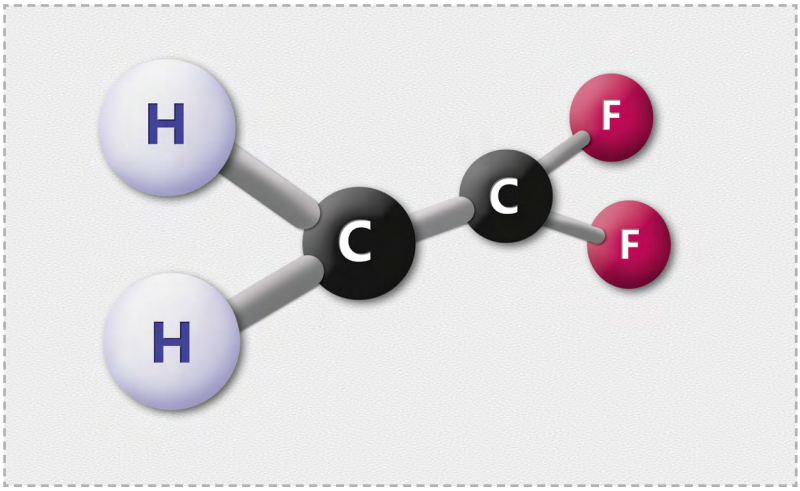
L'ingénieur de recherche Shirley Chai au centre R&D ARKEMA.

Le Kynar® PVDF est utilisé comme liant polymère de l'électrode négative dont il assure le maintien mécanique de l'ensemble en cours d'utilisation. Sans ce lien, les batteries se déformeraient.

Le Kynar est un polyfluorure de Vinylidène $(CH_2–CF_2)$ n (*Fig. 3*).

Figure 3

Représentation tridimensionnelle de la molécule de Poly fluorure de vynilidène

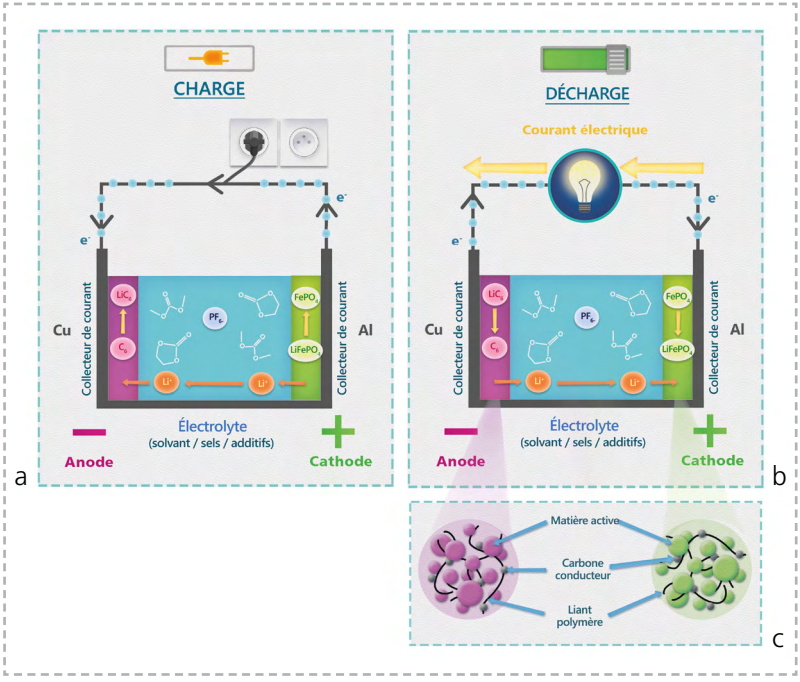


Ce polymère est ajouté au matériau actif de stockage du lithium, tel que le graphite, durant la charge (à raison de 1 à 2 % en poids).

La Figure 4 présente le schéma de fonctionnement simplifié d'une batterie lithium-ion durant la charge (*Fig. 4a*) et la décharge (*Fig. 4b*).

Figure 4

Schéma simplifié d'une batterie lithium–ion durant la charge et la décharge.



Sur cet exemple à la cathode (électrode positive) :

- le matériau actif est le $LiFePO_4$;
- le collecteur de courant est en aluminium ;
- le matériau actif de l'anode (électrode négative) est en graphite ;
- le collecteur de courant est en cuivre.

Durant la charge, des électrons quittent l'électrode positive (à gauche) par l'intermédiaire du circuit électrique externe et sont captés par l'électrode négative de graphite C_6 (à droite).

Cette circulation électrique externe est compensée dans la batterie par le déplacement équivalent des ions Li^+ de l'électrode positive (la cathode), au travers de l'électrolyte organique, vers l'électrode négative (l'anode) où ils sont stockés sous forme de lithium.

Durant la décharge, les deux processus sont inversés (*Fig. 4b*).

Les atomes de lithium quittent le graphite en libérant des électrons dans le circuit extérieur. Dans la batterie, les ions Li^+ formés migrent vers l'électrode négative où ils réagissent avec $FePO_4$ pour former le composé $FeLiPO_4$.

Les grains actifs des matériaux d'électrode sont représentés sur la *figure 4c*.

Shirley Chai, ingénieur de recherche, explique à Anna et Axel la fabrication des batteries. Le matériau actif de l'anode est préparé sous forme d'une pâte visqueuse constituée d'un mélange dans un solvant de graphite, de poudre de noir de carbone et de Kynar (*Fig. 5*).

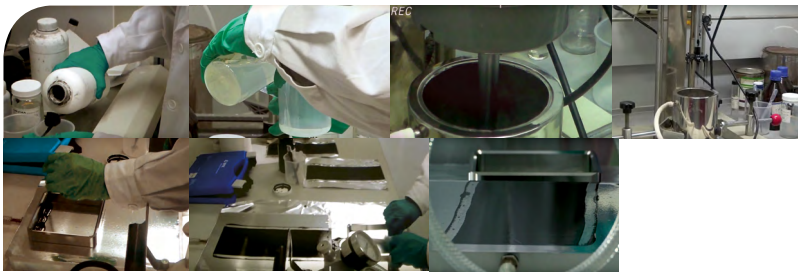


Figure 5

Préparation du matériau de l'anode.

La pâte visqueuse obtenue est ensuite uniformément étalée sur le collecteur de courant en cuivre (*Figs. 6a et b*).

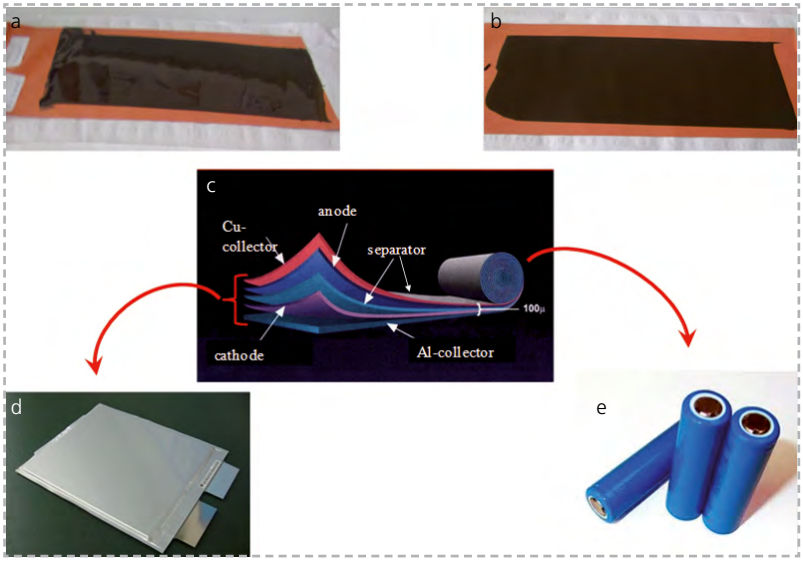


Figure 6

Fabrication de la batterie.
a) anode ; b) Anode ;
c) Séparateur ;
d) batterie prismatique ;
e) batterie cylindrique.

Le solvant est ensuite évaporé au four de manière contrôlée pour obtenir un dépôt solide de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur fortement adhérent au collecteur.

On procède de même pour la cathode. On place entre les deux électrodes, un séparateur isolant électrique qui est généralement un film de polymère poreux qui est aussi une résine de Kynar® PVDF gonflante qui laisse passer les ions lithium (*Fig. 6c*).

Ces assemblages multicouches sont empilés pour obtenir des cellules de batterie dites prismatiques (*Fig. 6d*) ou cylindriques (*Fig. 6e*).

Shirley montre une batterie cylindrique terminée. Dans une voiture électrique Tesla, il y a 7 000 cellules de ce type (*Fig. 8*).

Figure 8

Batterie cylindrique.

Monsieur Michael Zhu, directeur des ventes et du marketing pour l'Asie, explique à Anna et Axel que Arkema vend le Kynar® PVDF aux fabricants de batterie chinois (*Fig. 9*).

Figure 9

Rencontre avec Monsieur Michael Zhu, directeur des ventes et du marketing pour l'Asie.

Ces batteries équipent déjà les bus chinois (*Fig. 10*) comme l'explique le directeur des ventes du fabricant de batterie.

Figure 10

Batterie au Kynar d'un bus chinois.

C'est au volant d'une voiture équipée de batteries au Kynar que nos deux amis jouent les touristes (*Fig. 11*).

Figure 11

Départ d'Anna et Axel dans une voiture électrique.

Le plastique qui recycle le CO_2

Destination Allemagne : à Leverkusen, Marie (journaliste IEJ, Lille) et Esteban (IUT, Strasbourg) ont découvert un matelas qui lutte contre le changement climatique en utilisant une mousse de polyuréthane fabriquée à partir de CO_2 d'origine industriel recyclé.

C'est au Centre de R&D sur le polyuréthane de la Société Bayer que cette mousse est produite dans le cadre d'un programme joliment appelé **Dream production.**

Le Dr Karsten Malsh, Chef du projet Dream production, explique que les 10 % de CO_2 dans ces mousses sont issus de centrales thermiques dans le cadre d'un partenariat avec un industriel producteur d'électricité.

Figure 1

Un matelas en polyuréthane fabriqué à partir de CO_2 industriel recyclé.

Le Docteur Hofman, Directeur du laboratoire de chimie, présente la fabrication du polyuréthane par réaction entre un polyol et l'isocyanate (*Fig. 2*) qui forme rapidement une mousse de polyuréthane (*Fig. 3*).

Figure 2

Fabrication du polyurethane.

L'innovation dans cette fabrication réside dans le fait que le polyol est produit à partir du CO_2 industriel recyclé, en présence d'un catalyseur dont bien entendu la composition est un secret industriel.

Figure 3

Production du Polyol à partir de CO_2 industriel recyclé.

Figure 4

Voici une bien agréable façon de participer à la lutte contre l'effet de serre !

Sur les ailes de l'avion solaire

Destination Suisse : C'est à Payerne que Fleur (Journaliste IEJ, Paris) et Pierre (élève ingénieur ENSC, Lille) ont rencontré André Borschberg, pilote et cofondateur de Solar Impulse, qui leur a présenté l'avion solaire (Fig. 1).

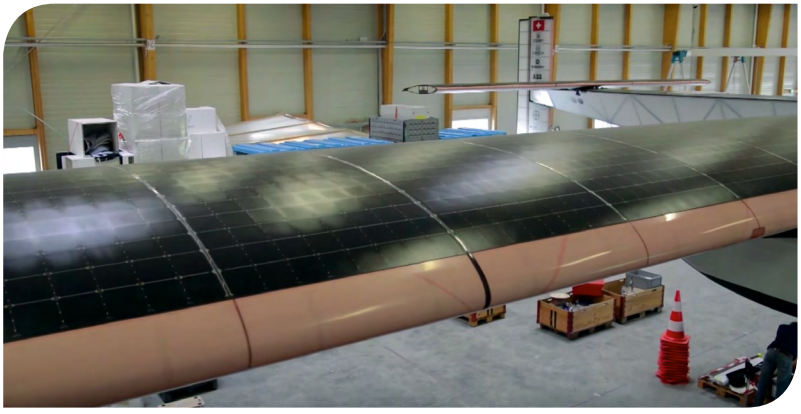
Figure 1

L'avion solaire.

L'avion solaire ne vole que grâce à l'énergie solaire. Pour cela, ses ailes de 36 m de long sont recouvertes chacune de 17 000 cellules photovoltaïques (*Fig. 2*).

Figure 2

Les cellules photovoltaïques des ailes de l'avion solaire.



De fait, les ailes représentent 90 % de l'avion solaire qui doit être le plus léger possible, et il faut les protéger, notamment de l'humidité au-dessus et au-dessous.

Pour les protéger, on les recouvre d'un film polymère, ultra-fin, ultra-résistant et bien sûr ultra-transparent : le Halar® ECTFE, fabriqué par Solvay.

Pierre et Fleur sont donc allés visiter le centre de Recherche et Développement de Solvay à Bollate près de Milan où est fabriqué le Halar® ECTFE. Serena Carella, responsable R&D, leur explique comment il est obtenu par copolymérisation de l'éthylène et du trifluorochloroéthylène (*Fig. 3*). Le trifluoroéthylène donne au copolymère sa résistance et ses bonnes propriétés mécaniques.

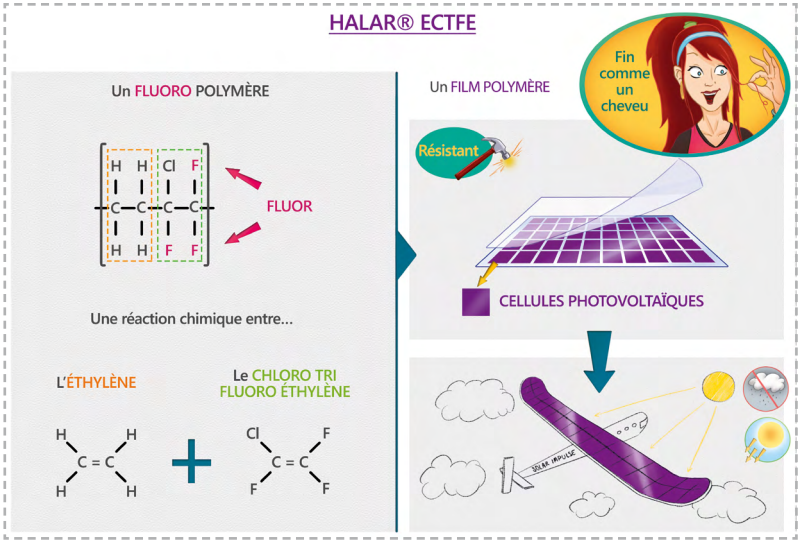


Figure 3

Principe de préparation du Halar.

Le Halar est obtenu sous forme de pastilles ou de granulés qui sont ensuite mis en forme selon le type d'application souhaité. Pour protéger les ailes de l'avion solaire, les granulés de Halar sont fondus puis étalés sous forme de film de 20 µm d'épaisseur (l'épaisseur d'un cheveu) (*Fig. 4*).

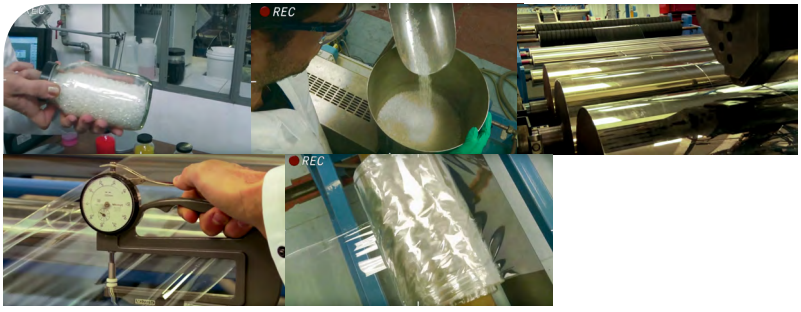


Figure 4

Préparation du film de Halar.

Luciano Mozzo est directeur de R&D pour les applications aux cellules photovoltaïques.

Sur la *figure 5*, il montre à Fleur et Pierre comment on encapsule les cellules photovoltaïques de l'avion solaire avec le film de Halar.

Figure 5

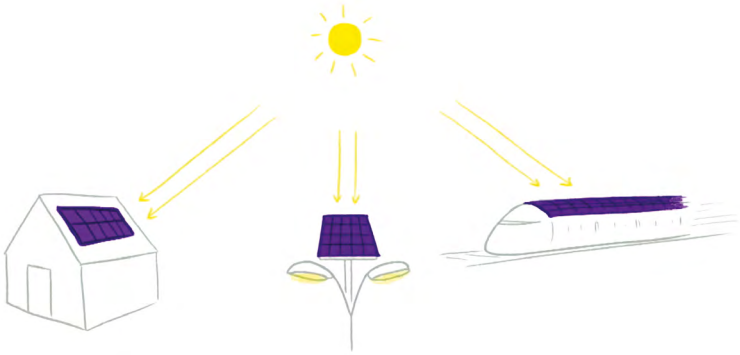
Encapsulation des cellules photovoltaïques de l'avion solaire dans un film de Halar.

Ensuite, il faut tester la transparence et vérifier que le film de Halar est aussi transparent que le verre.

Le Halar est également utilisé pour protéger les modules photovoltaïques commerciaux que l'on met sur les toits des maisons (*Fig. 6*).

Figure 6

Les autres applications photovoltaïques du Halar.



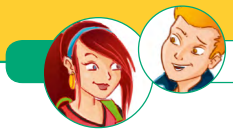
LES CHIMISTES ET L'ÉNERGIE EN FRANCE

Quelles que soient les solutions mises en avant pour l'approvisionnement en énergie, la chimie intervient partout. Quelles que soient les causes du changement climatique, lutter contre le réchauffement climatique demande de mobiliser des leviers dans lesquels la chimie et son industrie jouent et devront jouer un rôle moteur pour remplacer les sources de matière première fossiles.

Les Sciences de la chimie concernées

Les précédents chapitres de cet ouvrage ont montré qu'une nouvelle chimie et des nouvelles technologies sont en développement :

- pour diminuer ou recycler le CO_2 d'origine industrielle ;
- pour développer les applications industrielles de la chimie du végétal ;
- pour mettre à la disposition des particuliers, des industries de la chimie et de toutes les industries qui utilisent leurs produits, des solutions innovantes qui réduisent l'empreinte énergétique ;
- pour permettre le développement des énergies renouvelables.



Les métiers dans ces différents domaines sont accessibles :

- à tous les niveaux de formation (du Bac à Bac+8)
- dans tous les champs disciplinaires de la chimie : chimie du solide et des polymères, chimie organique, chimie-physique, chimie théorique, chimie analytique, catalyse, électrochimie…

Ou s'exercent ces métiers ?

Les métiers associés se rencontrent dans les organismes de recherche publics (universités, écoles d'ingénieurs, CNRS, CEA, IFP énergies nouvelles…), dans les centres de recherche et de production industriels des secteurs des énergies fossiles, des carburants, de l'énergie nucléaire, des énergies renouvelables, des bio-ressources de grands groupes industriels et des PME.

POUR EN SAVOIR PLUS consulter http://mediachimie.org/metier/6

Pour mieux connaître les métiers associés, consultez les fonctions et domaines d'activité suivants :

- Recherche et développement
- Procédés
- Production et maintenance
- Analyse laboratoire et contrôle qualité
- Qualité, hygiène, sécurité et environnement
- Enseignement

Pour répondre à la demande des consommateurs et leur faire connaître les produits réalisés, les chimistes vont être impliqués aussi dans les fonctions et domaines d'activité suivants :

- Marketing et ventes
- Logistique et achats

LES FICHES MÉTIER

Chef de projet/responsable d'équipe de recherche (h/f)

Au quotidien
Le chef de projet est responsable d'une équipe de recherche.
Il contribue à la définition d'un projet en cohérence avec la stratégie de l'entreprise.
Il définit la stratégie de recherche et optimise les ressources humaines techniques et financières à utiliser en tenant compte des contraintes de délais.
Il anime son équipe de recherche, il évalue les résultats collectifs et individuels.
Il dialogue avec les responsables des autres disciplines de l'entreprise.
Il connaît l'état de la concurrence et effectue une veille scientifique rigoureuse.
Il contribue à la formation et au développement de carrière de ses collaborateurs.

Formation et prérequis

- Niveau Bac+5 (école d'ingénieurs ou université) à Bac+8 (doctorat) selon le domaine concerné.
- Bonne maîtrise de l'anglais.
- Plusieurs années d'expériences comme ingénieur de R&D.

Qualités requises

- Solide expérience scientifique et technologique, sens de l'innovation.
- Grande capacité managériale.
- Savoir gérer la complexité et faire des choix rigoureux en s'appuyant sur de grandes capacités d'analyse.

Environnement de travail

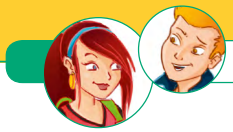
- Son bureau est localisé généralement au siège de l'entreprise mais il est amené à se déplacer dans les autres centres de recherches et les usines des différents pays d'implantation.
- Il assiste à des séminaires, colloques et salons professionnels en France et à l'étranger.
- Il collabore avec les différents métiers de l'entreprise : les chercheurs, l'équipe commerciale, les administratifs du contrôle de gestion, les responsables de la prospective et de l'analyse du marché.

Débouchés et évolution

- Directeur de R&D.

Salaire

- 55 000 à 85 000€.



Directeur commercial/ directeur des ventes (h/f)

Au quotidien

Il a une parfaite connaissance des produits de l'entreprise.
Il possède une double compétence scientifique/technique et commerciale et travaille en collaboration étroite avec les équipes de production et de marketing.
Il organise et coordonne l'activité des équipes commerciales.
Il organise le réseau commercial et sa présence géographique et il les adapte à l'évolution du marché.
Il anime et motive les équipes, évalue les résultats collectifs et individuels et contribue à la formation de ses collaborateurs.
Il gère des budgets de fonctionnement, d'investissement, de promotion et de publicité.

Formation et prérequis

- Bac+5 avec éventuellement une formation complémentaire (école d'ingénieurs + formation commerciale, école de commerce + formation scientifique, maîtrise professionnelle spécialisée + école de commerce).
- Maîtrise de l'anglais.
- Une expérience professionnelle de 5 à 10 ans est généralement requise.

Qualités requises

- Charisme, avoir un bon relationnel, être réactif et pédagogue.
- Être un bon manager et un excellent négociateur.

Environnement de travail

- Le siège de l'entreprise mais il est en relation avec tout le réseau commercial national et international de l'entreprise, ainsi qu'avec les chefs de projet.
- Il peut être aussi localisé dans une filiale à l'étranger.
- Nombreux déplacements nationaux et internationaux.

Salaire

- Négocié selon l'âge et les responsabilités de 58 000 € à 130 000 €.

Directeur de recherche et de développement (h/f)

Autres appellations : directeur scientifique, responsable R&D, directeur de laboratoire.

Au quotidien

Définit, pilote la politique de recherche et développement.Contrôle sa mise en œuvre avec les ressources et moyens nécessaires (humains, financiers, techniques, informatiques) dans le cadre de la stratégie de l'entreprise.

- Avoir des capacités de synthèse, d'analyse et d'arbitrage.
- Savoir diriger, animer et développer une (ou plusieurs) équipes de professionnels.
- Savoir argumenter, valoriser promouvoir.
- Savoir travailler en réseau.

Environnement de travail

- Centre de recherche d'une grande entreprise ou d'une PME dans de très nombreux secteurs d'activité.

Formation initiale et prérequis

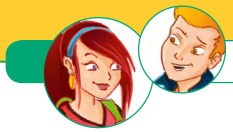
- Bac+5 à Bac+8 suivie très souvent d'une formation postdoctorale.

Qualités requises

- Large culture scientifique de haut niveau, le plus souvent pluridisciplinaire.
- S'exprimer dans une langue étrangère.
- Savoir manager des projets, conduire des changements.
- Savoir mesurer des résultats, évaluer l'efficacité et la performance.

Salaire

- Ce poste n'est accessible qu'après une large expérience en R&D.Le salaire dépend de l'âge, du nombre d'équipes à diriger et de la taille de l'entreprise et peut varier entre 80 000 et 135 000 €.



Enseignant-chercheur/ chercheur (h/f)

Au quotidien

Fait de la recherche dans son domaine d'expertise et pour l'enseignant-chercheur, enseigne auprès des étudiants en université ou dans des écoles d'ingénieurs.

Communique sur ses travaux de recherches :
- en publiant des articles dans des revues scientifiques nationales et internationales ;
- en faisant des conférences dans des séminaires et colloques nationaux et internationaux.

Formation et prérequis

- Bac+8 (master de recherche ou diplôme d'ingénieur suivi d'une thèse).
- Une formation postdoctorale, souvent à l'étranger est appréciée.

Qualités requises

- Culture scientifique de haut niveau.
- Curiosité et ouverture d'esprit.
- Savoir faire preuve de créativité, de ténacité, d'esprit critique.
- Aimer confronter les savoirs, produire de la connaissance et savoir la transmettre.
- Une bonne maîtrise de l'anglais est indispensable.

Environnement de travail

- Au sein des laboratoires des grands organismes de recherche publique, des universités et des écoles d'ingénieurs.

Salaire

- Enseignement supérieur 27 200 à 41 000€.
- Organisme de recherche 25 700 à 48 000€.

Débouchés et évolution

Sur concours :au niveau des universités :
- professeur d'université ;
- au niveau national pour les organismes de recherche : directeur de recherche.

Ingénieur de recherche et développement (h/f)

Au quotidien

L'ingénieur de recherche ou chercheur est au cœur de l'innovation et crée au quotidien de nouvelles molécules, des solutions techniques originales, recherche de nouvelles applications ou de nouvelles propriétés dans le cadre d'un projet de recherche qu'il aura contribué à élaborer. Il doit pour cela exercer une veille scientifique permanente ainsi qu'un état des lieux en temps réel des avancées de la concurrence.
Il peut travailler seul mais a souvent la responsabilité d'une petite équipe de techniciens.

Formation et prérequis

- Bac+5 (école d'ingénieurs ou université) à Bac+8 (doctorat) selon le domaine concerné.Bonne maîtrise de l'anglais.Après leur thèse, certains docteurs font une ou plusieurs années en stage postdoctoral en France ou à l'étranger pour devenir expert sur certains sujets spécifiques.

Qualités requises

- Avoir le sens de l'organisation du travail scientifique et de la gestion d'équipe.
- Savoir travailler avec des équipes d'autres disciplines.Être créatif, scientifiquement rigoureux , avoir des capacités de synthèse et d'analyse.Avoir une large culture scientifique et l'envie d'apprendre. Être passionné et persévérant.

Environnement de travail

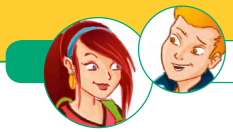
- Le centre de recherche ou un site de production.Le laboratoire de R&D est à la charnière entre la production, ce qui la précède et ce qui en découle. Il est en contact permanent avec les laboratoires extérieurs.L'ingénieur R&D participe à des colloques et séminaires en France et à l'étranger.

Débouchés et évolutions

- Chef de projet.

Salaire

- Début de carrière 37 600 €.
- Fin de carrière selon les responsabilités 98 000 €.



Ingénieur technico-commercial/ attaché technico-commercial (h/f)

Au quotidien

Il est à l'écoute d'une clientèle de professionnels auxquels il doit apporter des solutions techniques sous forme de produits ou d'équipements.
Pour cela, il doit connaître les produits de l'entreprise au plan technique, et savoir les adapter aux besoins des clients. Il a un rôle de conseil important.
Il veille à la disponibilité des produits et à l'efficacité du service après-vente.
Il est donc en relation étroite avec la production et les équipes de marketing.
L'aspect négociation des conditions commerciales fait partie de sa mission.
Il gère et fait évoluer un portefeuille client.

Formation et prérequis

- Le métier nécessite une double compétence scientifique/technique et commerciale.
- Bac+5 (école d'ingénieurs + formation commerciale, école de commerce + formation scientifique).
- Bonne maîtrise de l'anglais.
- Une formation Bac+2 ou Bac+3 à caractère scientifique peut permettre, après plusieurs années d'expérience dans l'activité commerciale, d'atteindre ce poste.

Qualités requises

- Qualités de contact, de diplomatie.
- Sens de la communication et de la négociation.
- Rigueur dans le respect des règlementations commerciales.
- Autonomie dans la gestion du temps et des priorités.

Environnement de travail

- Siège ou site de production.
- Clientèle localisée sur une zone géographique plus ou moins importante entraînant de nombreux déplacements.
- Relations nombreuses avec les équipes de production, de R&D, de marketing.

Débouchés et évolution

- Directeur de vente, responsable d'un secteur commercial.

Salaire

- 25 000 à 37 000€.

Professeur d'université/ directeur de recherche (h/f)

Au quotidien

Dirige une ou plusieurs équipes de recherche d'un laboratoire de recherche publique.
Pour les professeurs, conçoit et enseigne simultanément, un enseignement magistral dans l'enseignement supérieur (université ou école d'ingénieurs).
Pour les professeurs, coordonne une équipe d'enseignement.
Communique sur les travaux de recherche au niveau international (colloques, séminaires, publications écrites).
Exerce des responsabilités politiques et administratives, scientifiques et/ou pédagogiques, au niveau d'un établissement.

Qualités requises

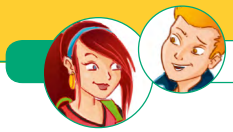
- 10 à 15 années d'expérience.
- Large culture scientifique de haut niveau.
- Être connu pour la qualité scientifique des travaux de recherche au niveau national et international.
- Qualités managériales scientifiques et administratives.
- Charisme et qualités pédagogiques pour les professeurs.
- Maîtrise de l'anglais.

Lieu de travail

- Universités, écoles d'ingénieurs, laboratoires des grands organismes de recherche.

Salaire

- 45 000 à 65 000€)selon le grade et l'ancienneté.



Responsable de production/ directeur de fabrication (h/f)

Au quotidien

Il est responsable des moyens humains et techniques et à ce titre coordonne l'ensemble des unités de production.
Il définit les allocations de moyens et gère les priorités par rapport aux ressources humaines et financières en cohérence avec la stratégie de l'entreprise.
Il veille à l'adaptation et à l'évolution de l'outil de production ainsi qu'au développement des équipes.
Il fait respecter les règles relatives à l'hygiène, la sécurité et le respect de l'environnement.

Formation et prérequis

- Bac+5 (école d'ingénieurs ou maîtrise professionnelle en chimie, génie chimique ou procédés). Ces formations se font en formation initiale ou en alternance.

Qualités requises

- Compétences pluridisciplinaires en chimie, génie chimique, techniques industrielles, management, gestion.
- Sens des relations humaines.

Environnement de travail

- Site de production : travail collaboratif important.
- Déplacements surtout locaux et régionaux.

Débouchés et évolution

- Large gamme de postes possibles de responsable industriel en usine de plus grande taille ou au siège.

Salaire

- 40 000 à 60 000 €.

Technicien de laboratoire de R&D (h/f)

Au quotidien

Il met en œuvre les différentes étapes des opérations définies par l'ingénieur de recherche, de la réaction nouvelle et l'optimisation.
Il travaille en laboratoire avec du matériel très diversifié qu'il sélectionne selon les besoins : matériel de synthèse, équipements de tests et d'analyses physico-chimiques, matériel informatique.
Il est confronté en permanence à la nouveauté.
Il travaille dans le cadre de la réglementation qui définit des règles strictes en matière d'hygiène de sécurité et d'environnement.

Formation et prérequis

- Bac+2 (BTS ou DUT) ou Bac+3 (licence professionnelle chimie).
- En formation initiale ou dans le cadre d'un contrat d'alternance en entreprise.

Qualités requises

- Connaissances scientifiques larges en chimie.
- Qualité de mise en œuvre technique.
- Rigueur et sens aigu de l'observation et de l'analyse.
- Savoir travailler en équipe.

Environnement de travail

- Il travaille au laboratoire de R&D au sein d'une équipe de recherche sous la responsabilité de l'ingénieur de recherche.
- Contact avec les membres des équipes de fabrication et d'analyse.

Débouchés et évolution

- Après formation, responsabilité d'une équipe de recherche, de production ou d'analyse.

Salaire

- 20 000 à 30 000 €.

4 PARTIE

LE COIN DES JEUX

ÉNIGMES

MOTS CROISÉS

ÉNIGMES

Des solutions détaillées sont proposées sur le site de Médiachimie dans l'espace éducation collège (mediachimie.org).
Le niveau requis pour chaque exercice est précisé grâce au symbole : ★ (de la 6e à la 4e) ; ★★ (à partir de la 3e).

Équivalent carbone ou CO_2 ?★

Coup de pouce

L'équivalent carbone représente les 12/44 de l'équivalent CO_2.

Max « Je n'y comprends rien ; on parle tantôt d'équivalent carbone, tantôt d'équivalent CO_2. Est-ce la même chose ? »
Léa « Non, mais les deux sont liés, bien sûr ! Une molécule de CO_2 est constituée d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène. La masse molaire du carbone est de 12 g/mole et celle du CO_2 est de 12 + 2 × 16, soit 44 g/mole ».

Si la production d'acier à partir de ferraille recyclée génère 1 100 kg d'équivalent CO_2 par tonne d'acier, quel est l'équivalent carbone produit pour une tonne de ce même matériau ?

.....

.....

Réponse : 300 kg.

L'ozone, bon ou mauvais ? ★

Coup de pouce

Si le dioxygène est 1,11 fois plus dense que l'air et l'ozone est 1,5 fois plus dense que le dioxygène, l'ozone est 1,11 × 1,5 fois plus dense que l'air.

Léa « Tu comprends cela, Max, on dit qu'il faut protéger la couche d'ozone, et par ailleurs lors des pics de pollution, l'ozone est un danger pour la santé ? »
Max « Oui, dans la haute atmosphère, l'ozone, de formule chimique O_3 (alors que le dioxygène a pour formule O_2) protège la Terre des rayonnements solaires nocifs en réfléchissant une partie de ces rayonnements. Mais dans la basse atmosphère, celle que nous respirons, lors des périodes de canicule sans vent, l'ozone, plus lourd que l'air, peut polluer les villes et nuire à la santé de leurs habitants. »
À une température de 0 °C et dans des conditions normales de pression, un mètre cube d'air pèse 1,292 kg, le dioxygène est 1,11 fois

plus dense que l'air, tandis que l'ozone est 1,5 fois plus dense que le dioxygène.

Combien pèse un mètre cube d'ozone dans les mêmes conditions de pression et de température ?

.....

.....

Réponse : environ ≈ 2,15 kg.

Des voitures plus légères pour consommer moins ★

Léa « Il paraît qu'entre 1960 et aujourd'hui, les voitures de tourisme sont passées en moyenne de 750 à 1 200 kg. C'est dû notamment aux contraintes de sécurité sur la structure des véhicules, qui ont été considérablement renforcées ».

Max « Oui, mais cette tendance va maintenant s'inverser. On va utiliser des matériaux plus légers que l'acier comme l'aluminium ou des matériaux composites ; on va aussi coller les pièces plutôt que d'utiliser des boulons. »

Supposons qu'à moteur égal, un allègement de 100 kg sur un véhicule permette une diminution de la consommation de 7 %. On procède à trois allègements successifs de 100 kg de la structure d'une voiture consommant en moyenne 6,5 litres de carburant aux 100 km, en conservant la même motorisation.

Coup de pouce

Attention, il ne faut pas additionner les pourcentages, car ils ne s'appliquent pas à la même masse !

Quelle serait alors la consommation du véhicule après ces trois allègements successifs ?

.....

.....

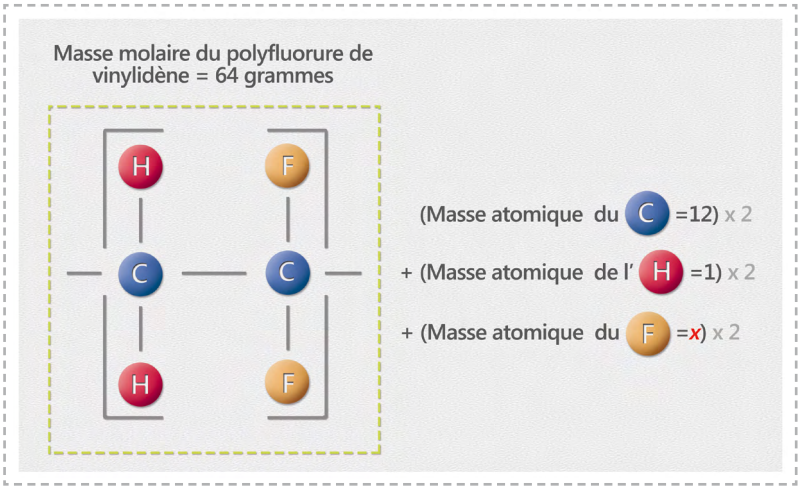
Réponse : environ 5,3 litres aux cent kilomètres.

Des batteries plus performantes *

Max « Les voitures électriques, c'est super, mais leur gros défaut, c'est le manque d'autonomie ! »
Léa « C'est vrai, mais des progrès dans la conception des batteries se font continuellement. On utilise maintenant dans les batteries un nouveau matériau : le polyfluorure de vinylidène qui rend la charge plus rapide et améliore beaucoup le rendement des batteries. »
Le polyfluorure de vinylidène est un polymère dont la maille de base est constituée de deux atomes de carbone, deux atomes d'hydrogène et de deux atomes de fluor.

Coup de pouce

La masse molaire d'une maille de polyfluorure de vinylidène s'obtient en ajoutant les masses atomiques correspondant à deux atomes de carbone, deux atomes d'hydrogène et deux atomes de fluor.



« Quelle est la masse molaire de cette maille ? » demande Max.
« Elle est de 64 grammes » répond Léa.

Sachant que la masse atomique du carbone est égale à 12, celle de l'hydrogène à 1, quelle est la masse atomique du fluor ?

.....

.....

Réponse : 19

L'âge de l'homme et celui de la Terre ★★

Léa « Tu imagines, Max, les scientifiques ont réussi à déterminer le climat d'il y a 700 000 ans, alors qu'on estime que notre espèce, l'homo sapiens, n'existe que depuis environ 200 000 ans ! »
Max « Oui, mais ces durées ne sont rien devant l'âge de la Terre, qui est de 4,5 milliards d'années ! ».

Si l'on représentait l'âge de la Terre par une durée de 24 heures, quelle durée correspondrait à l'âge de l'espèce humaine ?

.....

.....

Réponse : 3,84 secondes.

Coup de pouce

Le rapport entre la durée cherchée et une journée est le même qu'entre 700 000 ans et 4,5 milliards d'années.

Produire de l'acier ★★

Léa « La production mondiale actuelle d'acier est d'environ 1,5 millions de tonnes. En 2050, selon les prévisions de développement de production d'électricité à partir du photovoltaïque et de l'éolien, elle devrait être au moins de cinq millions de tonnes ».
Max « Oui, mais 50 % de la production d'acier est déjà faite à partir de ferrailles recyclées et non à partir du minerai de fer, dont l'extraction et la transformation génèrent trois fois plus d'équivalent CO_2 ».

En supposant qu'en 2050, on produise la moitié de cinq millions de tonnes d'acier à partir du recyclage et le reste à partir de l'extraction de minerai, quel sera l'équivalent CO_2 généré par la production mondiale d'acier ?

.....

.....

Réponse : 11 000 000 t.

Coup de pouce

Calculer la part de l'équivalent CO_2 généré par l'acier produit à partir de ferrailles recyclées et la part générée à partir de l'extraction de minerai.

Utiliser le CO_2 dans l'industrie ? ★★

Max « On parle de stocker le CO_2. Mais n'est-il pas possible de l'utiliser pour fabriquer d'autres produits ? »
Léa « Oui, bien sûr, l'utilisation industrielle du CO_2 existe déjà, même si elle n'est pas encore très développée, mais elle va prendre beaucoup plus d'importance à l'avenir. On sait déjà fabriquer des résines et des polycarbonates à partir du CO_2. »
Les activités humaines produisent 30 gigatonnes de CO_2 par an. L'industrie en utilise actuellement 150 mégatonnes.

Quelle part de la production de CO_2 d'origine humaine représente la quantité utilisée actuellement dans l'industrie ?

.....

.....

Coup de pouce

On rappelle qu'une mégatonne est égale à un million de tonnes et une gigatonne à un milliard de tonnes. 1 gigatonne = 10^9 tonnes (un milliard de tonnes) ; 1 mégatonne = 10^6 tonnes (un million de tonnes).

Réponse : 5 %.

Combien d'éoliennes pour 10 000 logements ? ★★

Max « Je me demande combien il faudrait d'éoliennes pour alimenter en électricité 10 000 logements ».
Léa « Tu peux faire le calcul. La consommation moyenne annuelle d'un foyer en France est d'environ 5 500 kWh (kilowattheures). Une éolienne de puissance 3 MW (mégawatts) fonctionne en moyenne à un peu plus de 20 % de sa puissance maximale ».

Combien une éolienne de 3 MW fonctionnant en moyenne à 20 % de sa puissance maximale fournit-elle de mégawatheures en un an ?
Combien faudrait-il d'éoliennes pour alimenter une ville de 10 000 foyers (en supposant que l'énergie puisse être stockée puis restituée pour les périodes sans vent) ?

.....

.....

Coup de pouce

1 MW = 1 000 000 W ; 1 kWh = 1 000 Wh ; 1 an = 8 760 heures ; 1 kWh est l'énergie que fournit un générateur d'une puissance de 1 kW en fonctionnant pendant une heure.

Réponse : 5 256 MWh ; 11 éoliennes.

De la slentite pour isoler deux fois mieux ★★

Max « Sais-tu que l'isolation de nos maisons est composée de 95 % d'air et de seulement 5 % de matière solide (polystyrène ou polyuréthane) ? »
Léa « Oui, mais il existe un nouveau matériau qui contient autant d'air et seulement la moitié de matière solide, la slentite. Elle permet donc d'obtenir la même isolation avec une épaisseur deux fois moindre ».

Coup de pouce

Dans la slentite, quel volume de matière solide est associé à 95 cm^3 d'air ?

Dans le polystyrène ou le polyuréthane expansé, que vaut le rapport (volume de matière solide)/(volume total) ?
Que vaut ce même rapport dans la slentite ?

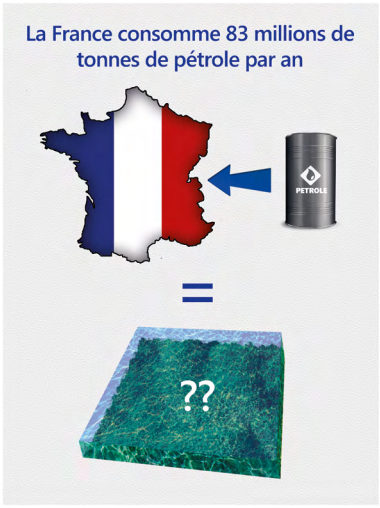
.....

.....

Réponse : 1/39.

Des microalgues pour valoriser le CO_2 ★★

Léa « Il paraît que les microalgues sont des organismes qui consomment du CO_2. Pourquoi ne les utilise-t-on pas ? »
Max « C'est à l'étude. Mais il ne faut pas croire que les microalgues permettront de capter tout le CO_2 de l'atmosphère, ni à produire l'équivalent de notre consommation de pétrole ! Elles pourront seulement permettre de valoriser une petite partie du CO_2 et de produire une partie très limitée des biocarburants que nous consommerons ».
On considère que 20 000 hectares d'algues en zone humide permettent de produire l'équivalent d'une tonne de pétrole. La France consomme environ 83 millions de tonnes de pétrole par an.



Quelle surface de microalgues permettrait une telle production ? Comparez cette surface avec celle de la Terre, qui est d'environ 510 millions de km².

.....

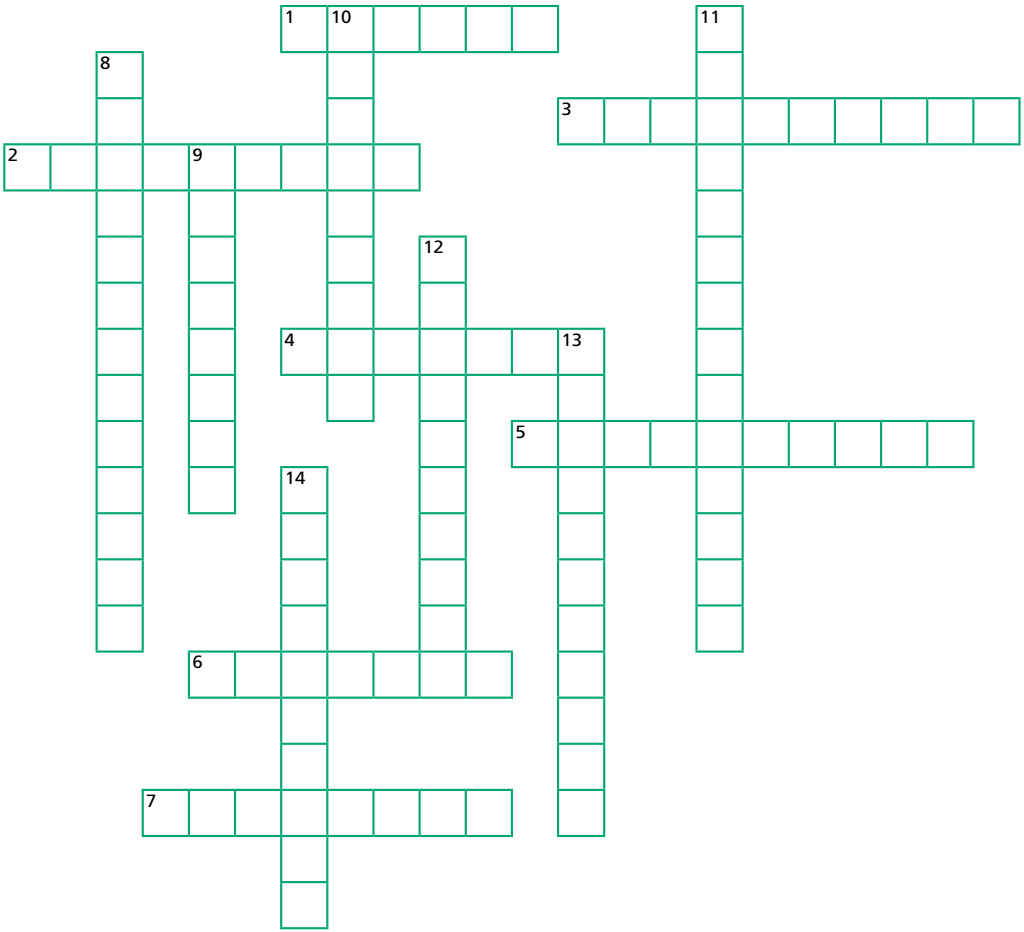
.....

Coup de pouce

1 hectare = 10 000 m^2 et 1 km^2 = 1 000 000 m^2 d'où 1 km^2 = 100 ha.

Réponse : 16 600 000 000 km^2. Soit plus de 32 fois la surface totale de la Terre.

MOTS CROISÉS


1
10
11
8
3
2
9
12
4
13
5
14
6
7

Définitions

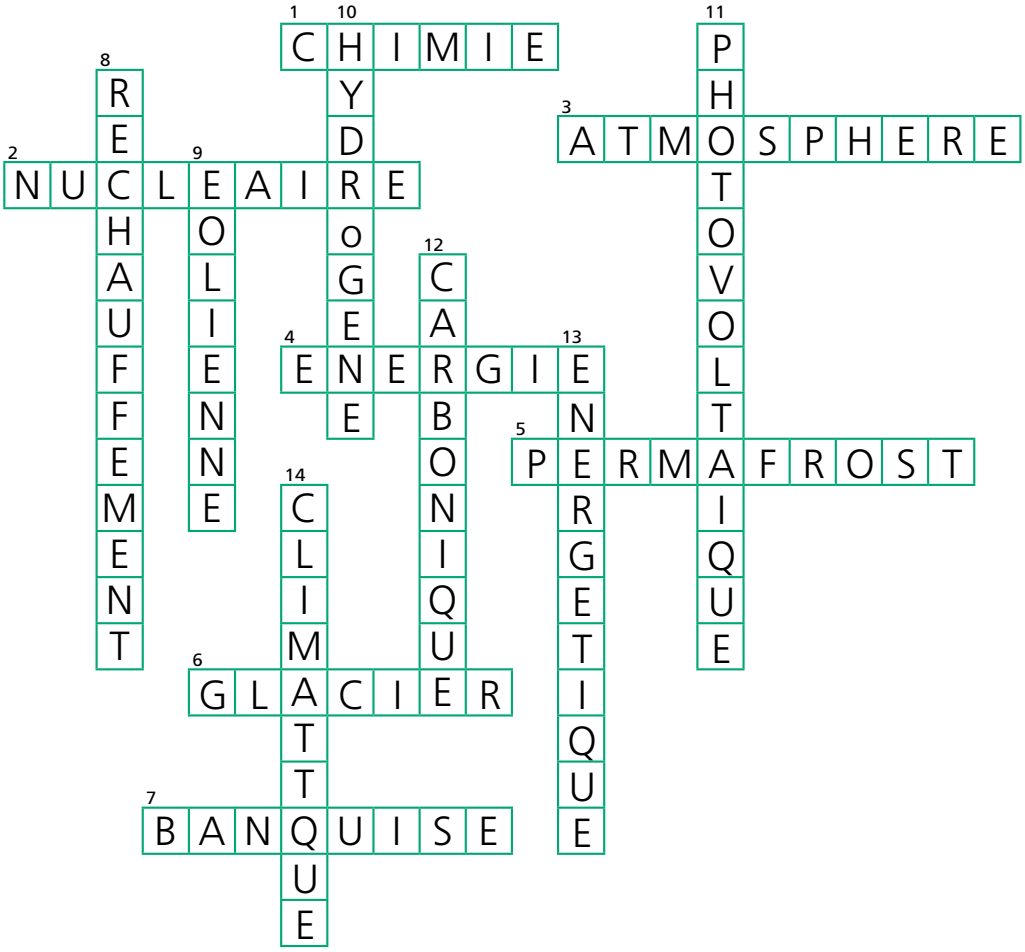
Horizontalement

1. Science qui étudie la matière et ses transformations.
2. Relatif au noyau.
3. Couche gazeuse qui enveloppe certains astres.
4. Capacité d'un système à fournir un travail.
5. Sol dont la température se maintient constamment en dessous de 0 °C.
6. Masse de glace formée par le tassement de couches de neige accumulées.
7. Couche de glace qui se forme à la surface d'une étendue d'eau.

Verticalement

8. Augmentation de température
9. Dispositif transformant l'énergie du vent en énergie électrique.
10. Élément chimique de symbole H.
11. Qui utilise l'énergie solaire pour produire du courant électrique.
12. Relatif au carbone.
13. Qui contient ou fournit de l'énergie.
14. Relatif au climat.

Solution :


1 CHIMIE
10 HYDROGENE
8 REHAUFFEMENT
2 NUCLEAIRE
9 OLIENNE
12 CARBONIQUE
4 ENERGIE
13 ENERGETIQUE
14 CLIMATIQUE
6 GLACIER
7 BANQUISE
11 PHOTOVOLTAIQUE
3 ATMOSPHERE
5 PERMAFROST